

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

المدرسة Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur en Sciences de la Mer

Option : Aménagement du Littoral

Thème :

**Biométrie foliaire de *Posidonia oceanica* (L.) Delile
et bioaccumulation des éléments traces dans ses rhizomes**

Présenté par :

BOUHOUÏ Fodil

Soutenu le : 22 /11/2017 devant le jury composé de :

Mlle LOUANCHI F.	Professeur	ENSSMAL	Présidente
M. SEMROUD R.	Professeur	ENSSMAL	Examineur
M. GRIMES S.	Maître de conférences A	ENSSMAL	Examineur
Mme BOUMAZA S.	Maître de conférences B	ENSSMAL	Promotrice

Année universitaire : 2017 - 2018

Océanologie
biologique



Université de Corse Pasquale Paoli
U.F.R. Sciences et techniques

**Biométrie foliaire de *Posidonia oceanica* (L.) Delile et bioaccumulation
des éléments traces dans ses rhizomes**

Mémoire présenté par BOUHOUÏ Fodil
**En vu de l'obtention du diplôme Master 2 Gestion de l'environnement et
valorisation des ressources naturelles**
Spécialité Gestion intégrée du littoral et des écosystèmes
2017-2018

Tuteur Professionnel
Jonathan RICHIR

Cotutrice professionnelle
Sylvie GOBERT

Tutrice et responsable pédagogique
Christine PERGENT- MARTINI

**Biométrie foliaire de *Posidonia oceanica* (L.) Delile et bioaccumulation
des éléments traces dans ses rhizomes**

Mémoire réalisé et soutenu par : BOUHOUÏ Fodil

Master 2 Gestion de l'environnement et valorisation des ressources
naturelles Spécialité Gestion intégrée du littoral et des écosystèmes –
Option Recherche Université de Corse Pasquale Paoli

Laboratoire d'accueil :

Laboratoire d'Océanologie

En collaboration avec l'unité d'Océanographie Chimique
Université de Liège, 4000 Liège, Belgique

Stage réalisé sous la direction de :

Dr Jonathan RICHIR, tuteur professionnel

Assistant Professeur

+32-78.61.14.01

jonathan.richir@uliege.be

Pr Sylvie GOBERT, cotutrice professionnelle

Directrice du laboratoire d'Océanologie– centre MARE

+32-43.66.33.29

sylvie.gobert@ulg.ac.be

Et

Pr Christine PERGENT-MARTINI, tutrice pédagogique

Maître de conférences-Habilitée à Diriger des Recherches

Responsable de la formation Gestion intégrée du littoral et des écosystèmes

+33 (0)4 95 45 00 55

pmartini@univ-corse.fr

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers le Réseau Mixte des Ecoles (RME), qui m'a accordé une bourse de mobilité pour bénéficier d'une formation de niveau Master 2 à l'université de Corse dans le cadre d'un programme de coopération algéro-français. Cette opportunité m'a permis d'effectuer le présent travail durant une aventure de dix mois.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude envers ma promotrice Mme. Boumaza S, et M. Semroud R qui ont accepté de diriger mon travail et qui n'ont cessé de prodiguer leurs conseils judicieux et permanents, qui m'ont été d'une aide précieuse.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers le directeur, le service des relations extérieures et mes professeurs et enseignants de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL), qui m'ont beaucoup soutenu durant mes phases d'études précédentes et dans la recherche de stage, notamment Mme. Alouache S.

J'adresse mes sincères remerciements à Mme. Pergent-Martini C, responsable de la formation Gestion Intégrée du Littoral et des Ecosystèmes (GILE), de m'avoir donné la chance d'intégrer ce master, ainsi que pour son aide et ses conseils durant cette année d'étude.

Je tiens à remercier profondément Mme. Gobert S, responsable du laboratoire d'océanologie de l'Université de Liège de m'avoir proposé ce sujet de stage de fin d'étude et de m'avoir accueillie dans ce laboratoire, en collaboration enrichissante avec l'unité de recherche en océanographie chimique dirigée par Mr. Borges A., que je remercie également.

Un grand merci à mon maître de stage, M. Richir J pour sa disponibilité, ses idées et conseils, son encadrement tout au long de ce travail, ainsi que pour son aide précieuse et son partage d'expertise.

Je remercie les membres de ce jury d'avoir accepté d'examiner ce travail : le professeur Louanchi F en tant que présidente, le professeur Semroud R et M. Grimes S. en tant qu'examineurs, et Mme Boumaza S. en tant que promotrice.

Je tiens également à remercier ma chère famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé pour arriver à ce succès.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES ABBREVIATIONS	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
INTRODUCTION	2
I. GENERALITES.....	4
I.1. Les éléments traces	4
I.1.1. Définition et origine des éléments traces	4
I.1.2. Suivi des éléments trace en milieu marin.....	5
I.2. <i>Posidonia oceanica</i> (L.) Delile	5
I.2.1. Description	5
I.2.2. Rôle et importance.....	6
II. MATERIELS ET METHODES.....	8
II.1. Présentation de la zone d'étude	8
II.2. Echantillonnage et mesure des paramètres environnementaux	9
II.3. Biométrie	9
II.4. Lyophilisation et minéralisation.....	10
II.5. Dosage des éléments traces.....	10
II.6. Analyses statistiques des données	10

III. RESULTATS	12
III.1. Paramètres biométriques et environnementaux	12
III.1.1. Paramètres environnementaux à 10m de profondeur	12
III.1.2. Paramètres environnementaux le long de profil bathymétrique.....	13
III.1.3. Paramètres biométriques du suivi saisonnier à 10 m de profondeur	15
III.1.4. Paramètres biométriques le long de profil bathymétrique	16
III.2. Concentrations des ETs dans les rhizomes de <i>Posidonia oceanica</i> (L.) Delile	17
III.2.1. Concentrations des ETs entre Stareso et Plateau des Chèvres	17
III.2.2. Concentrations des ETs du suivi spatial	21
III.2.3. Corrélation entre les différents ETs.....	24
IV. DISCUSSION.....	26
IV.1. Variations des paramètres environnementaux et biométriques.....	26
IV.1.1. Variations des paramètres environnementaux	26
IV.1.2. Cycle saisonnier et variation bathymétrique des paramètres biométriques	26
IV.2. Variations des concentrations en ETs dans les rhizomes de <i>Posidonia oceanica</i> (L.) Delile.....	27
IV.2.1. Concentrations des éléments traces entre Stareso et Plateau des Chèvres.....	27
IV.2.2. Variations spatiales des concentrations des ETs en baie de Calvi.....	29
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	31
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	33

LISTE DES ABBREVIATIONS

Ag: Argent

Al: Aluminium

As: Arsenic

Bi: Bismuth

C: Carbone

Ca: Calcium

Cd: Cadmium

Cl: Chlore

Co: Cobalt

Cu: Cuivre

Cr: Chrome

Fe: Fer

H: Hydrogène

Hg: Mercure

ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

K: Potassium

LC : Limite critique

LD : Limite de détection

LQ : Limite de quantification

Mg: Magnésium

Mn : Manganèse

Mo : Molybdène

N : Azote

Na : Sodium

Ni : Nickel

OMS : Organisation mondiale de la santé

P: Phosphore

Pb: Plomb

S: Soufre

Se : Sélénium

Si : Silicium

V : Vanadium

Zn : Zinc

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Éléments essentiels et non essentiels, abondants ou en traces (modifiés d'après Amiard., 2011).

Figure I.2. Schéma d'un rhizome de *Posidonia oceanica* (L.) Delile et de ses feuilles. (Arnaud Abadie., 2012).

Figure II.1. Localisation géographique des sites d'échantillonnage: [a] Plateau des Chèvres à l'est de Marseille; [b] la baie de Calvi avec les 6 sites retenus: Stareso (Star) à : 10, 20 et 30m de profondeur, ferme aquacole (Aqua), émissaire de Calvi (Emiss), et Punta Bianca (PB).

Figure III.1. Variations des valeurs journalières moyennes de l'intensité lumineuse mesurées entre 11 et 14h GMT à 10m de profondeur, à l'interface eau-sédiment (en noir) et à 8m de profondeur, au-dessus de la canopée (en gris), dans l'herbier de posidonie à Stareso (Corse, France).

Figure III.2. Evolutions des valeurs journalières moyennes de température mesurées entre 11 et 14h GMT à 10m de profondeur dans l'herbier de posidonie à Stareso (Corse, France).

Figure III.3. Evolutions saisonnières et bathymétriques des moyennes mensuelles (des valeurs journalières moyennes ont été moyennées) de l'intensité lumineuse, à 1, 8, 18, 28, et 35m de profondeur au-dessus de la canopée dans l'herbier de posidonie à Stareso (Corse, France).

Figure III.4. Evolutions saisonnières et bathymétriques des moyennes mensuelles (des valeurs journalières moyennes ont été moyennées) de la température à 3, 10, 20, 30, et 37m de profondeur à l'interface eau-sédiment dans l'herbier de posidonie à Stareso (Corse, France).

Figure III.5. Evolutions saisonnières des paramètres biométriques des faisceaux de *Posidonia Oceanica* (L.) Delile (n=6, moyennes + écart-type) collectés à 10m de profondeur, entre 15 avril 2015 et 12 juillet 2016, dans l'herbier de posidonie en face de la Stareso (Corse, France).

Figure III.6. Evolutions bathymétriques des paramètres biométriques des faisceaux de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (moyennes ± écart-type) collectés entre 3 et 36m de profondeur, entre 15 avril 2015 et 12 juillet 2016, dans l'herbier en face de la Stareso (Corse, France). Densité des faisceaux par profondeur (en faisceau.m²) : 636 (à -3m), 407 (à -10m), 235 (à -20m), 158 (à -29m) (Données de Richir), 66 (à -36m) (Pergent., 2009).

Figure III.7. Variations saisonnières (mars, juin et novembre) et multi annuelles (2008, 2009 et 2010) des concentrations de Se, As, Co, Cd, Ni, Zn, dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 9) (moyenne ± écart-type) échantillonnées à 10m de profondeur en face de Stareso (Calvi, Corse, France) et sur le Plateau des Chèvres (Marseille, France).

★ représente les concentrations inférieures à LQ.

Figure III.8. Variations saisonnières (mars, juin et novembre) et multi annuelles (2008, 2009 et 2010) des concentrations de Mo, V, Ag et Bi dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 9) (moyenne ± écart-type) échantillonnées à 10m de profondeur en face de Stareso (Calvi, Corse, France) et sur le Plateau des Chèvres (Marseille, France).

Figure III.9. Variations saisonnières (mars, juin et novembre) et multi annuelles (2008, 2009 et 2010) des concentrations de Fe, Cr, Mn, Al, Pb et Cu dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 9) (moyenne ± écart-type) échantillonnées à 10m de profondeur en face de Stareso (Calvi, Corse, France) et sur le Plateau des Chèvres (Marseille, France).

Figure III.10. Concentrations de Al, Ni, As et Bi, dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 11) (moyenne+écart-type) échantillonnées en juin 2010 aux différentes stations : Star (Stareso à 10, 20 et 30m de profondeur), PB (Punta Bianca), Emiss (Emissaire de Calvi) et Aqua (Cage aquacole au large de baie de Calvi). ★ représente les concentrations inférieures à LQ.

Figure III.11. Concentrations de Zn, Mo, V, Fe, Cr et Se dans les rhizomes *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 11) (moyenne + écart-type) échantillonnées en juin 2010 aux différentes stations : Star (Stareso à 10, 20 et 30m de profondeur), PB (Punta Bianca), Emiss (Emissaire de Calvi) Aqua (Cage aquacole au large de baie de Calvi).

Figure III.12. Concentrations de Ag, Mn, Cd, Co, Cu et Pb dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 11) (moyenne+écart-type) échantillonnées en juin 2010 aux différentes stations : Star (Stareso à 10, 20 et 30m de profondeur), PB (Punta Bianca), Emiss (Emissaire de Calvi) et Aqua (Cage aquacole au large de baie de Calvi).

Figure III.13. Matrice de corrélation de Pearson entre les éléments traces analysés dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile échantillonnées en juin 2010 aux différentes stations: Star (Stareso à 20 et 30m de profondeur), PB (Punta Bianca), Emiss (Emissaire de Calvi) et Aqua (Cage aquacole au large de baie de Calvi), et de façon saisonnière (mars, juin et novembre) et multi annuelles à 10m de profondeur en face de Stareso (Calvi, Corse, France) et sur le Plateau des Chèvres (Marseille, France).

INTRODUCTION

INTRODUCTION

En méditerranée, les herbiers à *Posidonia oceanica* (L.) Delile sont les plus répandus des magnoliophytes marines. Ils colonisent la quasi-totalité des côtes méditerranéennes et occupent une surface estimée de 25 000 à 50 000 km², soit 2 % de la surface totale de la mer Méditerranée (Pasqualini et al., 1998). Cependant, ils ont fortement régressé au cours du 20^{ème} siècle en raison des perturbations anthropiques et naturelles (Boudouresque et al., 2006a).

L'herbier de la Baie de la Revellata (Calvi) est très dense, caractérisé par une production et une biomasse élevée, et présente des fluctuations biométriques saisonnières et interannuelles marquées. Toutefois, par rapport à 1975, il a gardé ses caractéristiques biométriques (Gobert., 2002). *Posidonia oceanica* (L.) Delile est un bio-indicateur par excellence, étant une espèce sessile à large distribution, facile à prélever et qui accumule des contaminants à des teneurs élevées. Elle est résistante à la pollution et reflète l'état de contamination de l'eau et de sédiment (Pergent-Martini et Pergent., 2000). Elle a été largement utilisée pour la bio-surveillance des éléments traces (ETs) (Pergent-Martini et Pergent., 2000 ; Luy et al., 2012 ; Richir et al., 2013 ; 2015). Cependant, l'étude de l'accumulation de ces éléments, principalement dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile n'a pas fait l'objet d'un grand nombre de publications récemment. Les études qui existent sont soit issues d'une étude expérimentale (par exemple celle de Richir et al., 2013), soit avaient pour objectif principal la caractérisation et la compartimentalisation des éléments traces sans mettre en question leurs cinétiques d'accumulation (Sanz-Làzaro et al., 2012 ; Richir et al., 2013 ; Guendouzi et al., 2015).

Dans ce contexte, ce travail a été réalisé dans le cadre de mon stage de fin d'études au laboratoire d'océanologie de l'université de Liège, en collaboration avec l'unité de recherche en océanographie chimique de la même université. Ce travail avait pour objectifs :

- (1) Etudier l'évolution temporelle (hebdomadaire à bimensuelle) et bathymétrique des paramètres biométriques des faisceaux de feuilles de *Posidonia oceanica* (L.) Delile en baie de Calvi, en relation avec le cycle saisonnier des paramètres environnementaux de température et de lumière, puis mesurer, dans ces mêmes faisceaux de feuille, les teneurs en ETs pour en définir la dynamique naturelle fine en un site préservé.
- (2) Pour des raisons techniques qui ont empêché l'analyse des échantillons préparés pour l'objectif (1), la seconde partie de ce travail avait pour objectif l'analyse d'un jeu de données existant de teneurs en ETs dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile prélevés en différents sites à différentes périodes, afin d'étudier leur évolution spatiale et temporelle.

CHAPITRE I.

GENERALITES

I. GENERALITES

I.1. Les éléments traces

I.1.1. Définition et origine des éléments traces

Plusieurs définitions sont attribuées aux éléments traces. Selon l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC), les éléments traces sont des éléments ayant une concentration moyenne inférieure à environ 100 parties par million d'atome (ppma), soit moins de 100 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Récemment, Richir et Gobert (2016) ont pris en compte dans leur définition tout élément métallique ou non, autre que les éléments constitutifs majeurs (C, H, N, S, P, Si, Cl, K, Na, Ca et Mg) formant l'essentiel du vivant et de la matière minérale (sauf Fe et Al) dont les concentrations sont le plus souvent inférieures, mais parfois supérieures à 100 ppma selon la matrice analysée.

Les ETs peuvent être essentiels ou non essentiels. Les éléments essentiels tel que Fe, Cu, Zn, Co, Mn, Cr, Mo, V, Se et Ni (OMS., 1996) jouent un rôle important dans les systèmes biologiques, mais peuvent devenir toxiques au-dessus d'un certain seuil de concentration. Les éléments tel que Hg, Pb et le Cd ne jouent aucun rôle physiologique et se sont considérés comme des éléments non essentiels. Ils sont souvent toxiques même en très petites quantités (Turkmen et al., 2005).

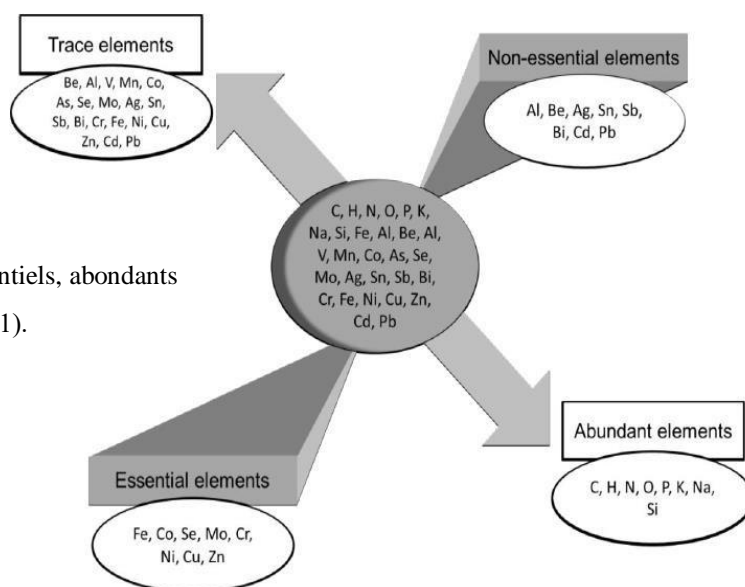


Figure I.1 Éléments essentiels et non essentiels, abondants ou en traces (modifiés d'après Amiard 2011).

Bien que les ETs soient présents naturellement dans l'environnement marin, les activités humaines ont conduit à l'augmentation de leurs concentrations ces dernières décennies (Pergent- Martini et Pergent., 2000). Ils proviennent principalement de rejets issus de l'exploitation minière (Callender, 2003).

D'autres sources importantes sont liées aux activités industrielles, agricoles ou urbaines en expansion dans les zones côtières depuis le début des années 60 (PNUE/PAM/Plan Bleu, 2009). Les ETs ne subissent pas de dégradation biologique ou chimique en arrivant en mer où ils s'accumulent (Turkmen et al., 2005). Au-delà d'un certain seuil, ces éléments deviennent toxiques pour les organismes aquatiques et sont susceptibles d'entraîner des dommages multiples à différents niveaux d'organisation : individu, population, communauté et écosystème (Nordberg et al., 2007).

En raison de leur toxicité, leur persistance, leur difficulté à être biodégradé et leur tendance à se concentrer dans les organismes aquatiques, ces éléments sont considérés comme de sérieux contaminants de l'environnement aquatique. D'où la nécessité de les étudier et de surveiller leurs niveaux environnementaux.

I.1.2. Suivi des éléments trace en milieu marin

Jusqu'au début des années 1970, la surveillance de la contamination chimique du milieu marin reposait uniquement sur l'analyse chimique de l'eau. Cette technique analytique ne fournit pas d'informations sur la biodisponibilité des éléments en traces, et ne permet pas de prévoir l'impact de ces substances sur les organismes (Rainbow., 1995). C'est dans ce contexte que Goldberg (1975) proposa l'utilisation d'organismes vivants pour évaluer la qualité du milieu marin, donnant ainsi naissance au concept d'indicateur biologique ou bio-indicateur.

Pour être considérées comme un bon bio-indicateur de pollution, les espèces choisies doivent satisfaire un certain nombre de critères, comme listé par Cossa (1989) et Rainbow (1993). Il a été démontré qu'une grande variété d'espèces représente des indicateurs pertinents pour évaluer les niveaux de contamination par les ETs dans les écosystèmes marins (Burger., 2006). En Méditerranée, la magnoliophyte marine *Posidonia oceanica* (L.) Delile est une espèce qui répond sensiblement et quantitativement à la contamination par des ETs (Luy et al., 2012 ; Richir et al., 2013 ; Richir et Gobert., 2014).

I.2. *Posidonia oceanica* (L.) Delile

I.2.1. Description

Posidonia oceanica (L.) Delile est une magnoliophyte marine endémique de la Méditerranée qui forme des vastes prairies mono-spécifiques de la surface à 40m de profondeur (Boudouresque et Meinesz., 1982). Elle est présente sur presque toutes les côtes méditerranéennes. Chaque faisceau de *Posidonia oceanica* (L.) Delile est composé de 4 à 8 feuilles, d'une tige appelé 'rhizome' et de racines. Les faisceaux rampants colonisateurs sont appelés plagiotropes tandis que les faisceaux dressés sont appelés orthotropes (Giraud., 1979 ; Boudouresque et Meinesz., 1982).

Les feuilles sont organisées de manière suivante : les plus anciennes feuilles se trouvent à l'extérieur du faisceau et les plus jeunes à l'intérieur (Boudouresque et al., 2006). La floraison de *Posidonia oceanica* (L.) Delile a lieu en automne et semble être corrélée avec des températures estivales élevées (Boudouresque & Meneisz., 1982).

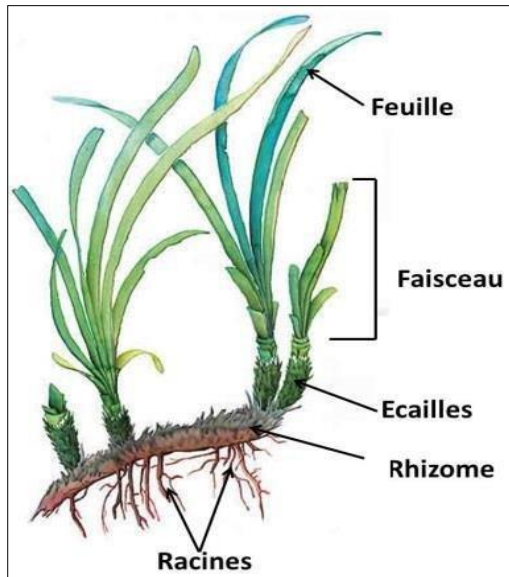


Figure I.2. Schéma d'un rhizome de *Posidonia oceanica* (L.) Delile et de feuilles. (Arnaud Abadie., 2012)

I.2.2. Rôle et importance

Les herbiers de posidonies sont essentiels pour l'écosystème méditerranéen car ils remplissent de nombreux rôles importants. Ils sont parmi les herbiers sous-marins les plus productifs, servant de base à divers réseaux alimentaires dans l'herbier et dans les écosystèmes adjacents (Boudouresque et al., 2006a). Ils abritent également une grande partie de la biodiversité de la Méditerranée, avec 20 à 25 % de cette biodiversité s'y trouvant (Boudouresque et al., 2004). De plus, ils sont un lieu de reproduction, de croissance et d'habitat pour de nombreuses espèces (Boudouresque et al., 2006a). Les herbiers sont également importants pour la production d'oxygène et la fixation de carbone.

Selon Romero et al. (2007), il existe une relation entre les caractéristiques physiologiques, morphologiques et structurelles des herbiers de posidonies et la qualité de l'environnement côtier méditerranéen. Le suivi de ces caractéristiques peut donc fournir de nombreuses informations utiles à des fins de gestion. Les herbiers de posidonies agissent comme une barrière végétale qui, d'un côté, piègent et accumulent les matières organiques et inorganiques, améliorant ainsi la transparence de l'eau, et, d'un autre côté, réduisent l'hydrodynamisme, protégeant ainsi le littoral de l'érosion. Les feuilles de *Posidonia oceanica* (L.) Delile qui tombent peuvent également être exportées vers les plages, constituant des banquettes qui protègent aussi contre l'érosion (Boudouresque et Jeudy de Grissac, 1983 ; Boudouresque et al., 2006).

CHAPITRE II.
MATERIELS ET METHODES

II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Présentation de la zone d'étude

Pour la biométrie, La collecte d'échantillons a été effectuée dans l'herbier en face de la station de recherches sous-marines et océanographiques 'Stareso' en baie de Calvi (42.580°N 8.725°E) en Corse (France).

Les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile analysés pour leurs teneurs en ETs ont été prélevés au niveau de sept stations différentes. Six d'entre-elles se situent en Baie de Calvi (le zoom "b" de la figure II.1): face à la Stareso à 10, 20 et 30m de profondeur (Star), près de l'émissaire évacuant les eaux usées de Calvi (Emiss), près des cages d'aquaculture au centre de la baie de Calvi (Aqua), et à la station Punta Bianca (PB) à l'extérieur de la baie, en mode battu. La septième station est située sur le Plateau des Chèvres (le zoom "a" de la figure II.1), près de l'émissaire de Cortiou qui déverse les eaux usées de la ville de Marseille.



Figure II.1. Localisation géographique des sites d'échantillonnage: [a] Plateau des Chèvres à l'est de Marseille; [b] la baie de Calvi avec les 6 sites retenus: Stareso (Star) à 10, 20 et 30m de profondeur, ferme aquacole (Aqua), émissaire de Calvi (Emiss), et Punta Bianca (PB).

II.2. Echantillonnage et mesure des paramètres environnementaux

Des prélèvements bimensuels à hebdomadaires de faisceaux de posidonies (n=6) ont été réalisés à 10 mètres de profondeur, entre le 15 avril 2015 et le 12 juillet 2016. Un profil bathymétrique d'échantillonnage a également été effectué aux profondeurs de 3, 10, 20, 29 et 36 mètres (n=6) entre le 26 juin et le 12 juillet 2015. L'échantillonnage a été réalisé selon la méthode peu invasive décrite par de los Santos et Gobert (2015) qui consiste à couper le faisceau de feuilles au-dessus du méristème tout en gardant le point d'insertion des feuilles. Les faisceaux ont ensuite été conditionnés en sachets et congelés à une température de -28°C.

De plus, des mesures de la température (en °C) et de la lumière (en lux) sur la même période ont été enregistrées à l'aide de sondes HOBO Pendant Température/Light (Onset Computer Corporation, MA, USA) déployées dans l'herbier. À chaque profondeur d'échantillonnage, un premier HOBO a été placé à l'interface eau-sédiment et un second à 2 mètres du fond au-dessus de la canopée de l'herbier (soit respectivement à 10 et 8 mètres de profondeur pour le suivi temporel à 10 mètres de l'herbier). Les mesures ont été prises toutes les 10 minutes, filtrées et moyennées aux dates d'échantillonnage entre 11 heures et 14 heures GMT.

Quinze pousses de posidonie ont été prélevées en juin 2010 à chaque station parmi les 6 situées dans la baie de Calvi. De plus, en mars, juin et novembre des années 2008, 2009 et 2010, quinze pousses de posidonie ont été prélevées à 10 mètres de profondeur en face de Stareso (station Star) et sur le Plateau des Chèvres (voir figure II.1).

II.3. Biométrie

En laboratoire, les faisceaux de *Posidonia oceanica* (L.) Delile échantillonnés dans la baie de Calvi en 2015-2016 ont été disséqués selon le protocole de Giraud (1979). Lors de la collecte, les faisceaux ont été coupés au-dessus du méristème, ce qui ne permet pas de distinguer les feuilles adultes, intermédiaires et juvéniles. Les épiphytes ont été retirés à l'aide d'une lame de rasoir, le seul élément métallique utilisé avec beaucoup de précaution.

A partir de ces mesures biométriques, les paramètres suivants ont été calculés :

- Surface foliaire = somme des longueurs des feuilles X moyenne des largeurs des feuilles
- Indice foliaire = surface foliaire moyenne des faisceaux X densité des faisceaux
- Coefficient A, qui correspond au pourcentage de feuilles ayant perdu leur apex

Pour le dosage ultérieur des ETs (qui n'a pas été réalisé pour les raisons mentionnées précédemment), les 20cm du milieu de la troisième feuille de chaque faisceau (à l'exclusion des feuilles juvéniles) marquée *in situ* (marque de Zieman ; Zieman., 1974) ont été disséqués. Les poids frais de ces 20 cm de feuilles, du reste des faisceaux de feuilles et des épiphytes ont été récupérés puis pesés dans des vials pré-tarés. L'ensemble a été recongelé à -28°C.

II.4. Lyophilisation et minéralisation

Les échantillons ont été lyophilisés pendant 48 heures minimum à l'aide d'un appareil de lyophilisation (CHRIST LCG LyochamberGuard 121550 PMMA/Alpha 1-4 LD plus) puis leurs poids sec a été mesuré. Les 20 cm lyophilisées du milieu de la 3^{ème} feuille et les réactifs nécessaires à la digestion [H₂O/HNO₃/H₂O₂ : 5ml/2ml/1ml] sont insérés dans des bombes en téflon (Protocole de Richir et al., 2013). Les bombes ont ensuite été chauffées dans un four à micro-ondes (Ethos D, MilestoneInc) pendant 25 minutes. Les minéralisas ont ensuite été récupérées et diluées avec de l'eau MilliQ pour obtenir un volume final de 50 ml.

Des matériaux de référence certifiés (CRMs) (BCR60 : *Lagarosiphonmaj*; BCR61 : *Platithyphidiumrip*; BCR62 : *Oleauropean*; V463 : Maïs ; GBW07603 : Bush branches and leaves) et des blancs ([H₂O/HNO₃/H₂O₂ : 5ml/2ml/1ml] sans échantillon) ont également été minéralisés selon le même protocole.

II.5. Dosage des éléments traces

Les échantillons minéralisés dans le cadre de cette étude n'ont pas pu être dosés pour des raisons précédemment mentionnées. Les données qui seront présentées dans la partie résultats proviennent d'analyses antérieures de rhizomes. Pour ces analyses, les deux premiers centimètres de 15 rhizomes ont été prélevés pour chaque date et station, disséqués, nettoyés de leurs écailles puis lyophilisés. Ils ont ensuite été poolés pour obtenir entre 200 et 300 mg de matière sèche (n = 5 -11) et enfin minéralisés.

Les concentrations en éléments traces des échantillons, les matériaux de référence certifiés et les blancs ont été mesurées à l'aide d'un spectromètre de masse avec plasma induit couplé à une chambre de réaction dynamique (ICP-MS ELAN DCR II, PerkinElmerInc). Les concentrations sont exprimées en microgrammes par gramme de poids sec $\mu\text{g.g}_{\text{ps}}^{-1}$. Pour chaque élément trace, la limite critique (LC), la limite de détection (LD) et la limite de quantification (LQ) ont été calculées selon les méthodes de Currie (1999) ou Grinzaid (1977).

II.6. Analyses statistiques des données

Les données ont été traitées et représentées graphiquement à l'aide des logiciels Excel (version 2007, Microsoft Corp.) et R. Afin de mettre en évidence les corrélations entre les éléments traces de manière générale, une matrice de corrélation de Pearson a été construite, en prenant en compte toutes les profondeurs, saisons et sites étudiés, en s'appuyant sur la loi des grands nombres. Plus le coefficient "r" de la matrice se rapproche des valeurs extrêmes de -1 et 1, plus la corrélation linéaire entre les éléments traces est forte (Fowler et Cohen, 1990).

CHAPITRE III.
RESULTATS

III. RESULTATS

III.1. Paramètres biométriques et environnementaux

Plusieurs paramètres et indices biométriques utilisés dans la littérature pour caractériser un herbier ont été analysés : biomasse foliaire et des épiphytes, indice foliaire, longueur des feuilles, surface foliaire, rapport E/F et coefficient A. L'évolution de ces paramètres a été examinée en parallèle avec les variations des facteurs environnementaux, notamment la température et la lumière.

III.1.1. Paramètres environnementaux à 10m de profondeur

Les valeurs moyennes journalières de l'intensité lumineuse montrent un cycle saisonnier avec des maxima en été et des minima en hiver (voir Figure III.1). Au-dessus de la canopée (à 8 mètres de profondeur), l'intensité lumineuse atteint son maximum le 5 juin 2015 avec une valeur de 18 524 lux, tandis que le minimum est enregistré le 14 janvier 2016 avec 430 lux. Cependant, l'intensité lumineuse qui atteint le pied des faisceaux de posidonies (à 10 mètres de profondeur) à l'interface eau-sédiment est moins importante. On observe un maximum de 2 636 lux enregistré le 24 septembre 2015 et un minimum de 18,7 lux enregistré le 16 mars 2016.

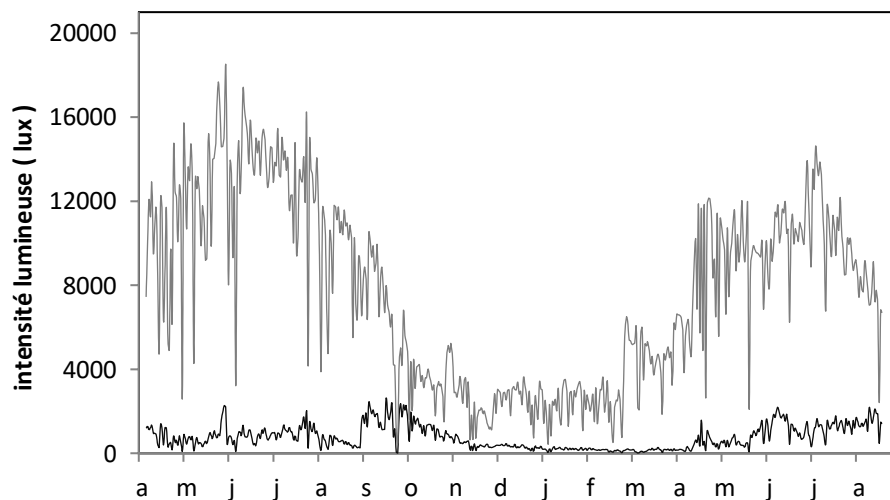


Figure III.1. Variations des valeurs journalières moyennes de l'intensité lumineuse mesurées entre 11 et 14h GMT à 10m de profondeur, à l'interface eau-sédiment (en noir) et à 8m de profondeur, au-dessus de la canopée (en gris), dans l'herbier de posidonie à Stareso (Corse, France).

Le cycle saisonnier est perceptible dans les valeurs moyennes journalières de températures enregistrées (Figure III.2). Les températures les plus élevées sont observées en été, atteignant un pic de 27.97°C le 24 juillet 2015, tandis que les plus basses sont enregistrées en hiver, avec une valeur minimale de 13.60°C mesurée le 11 et le 14 mars 2016.

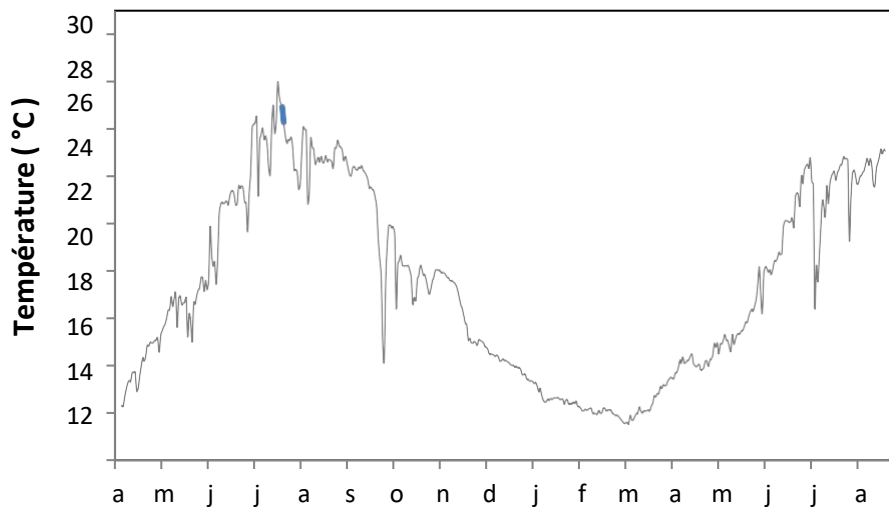


Figure III.2. Evolutions des valeurs journalières moyennes de température mesurées entre 11 et 14h GMT à 10 m de profondeur dans l’herbier de posidonie à Stareso (Corse, France).

Il y a un décalage temporel entre les enregistrements d’intensité lumineuse et de température. Ce décalage est plus important pour les valeurs minimales, soit trois mois, tandis qu’il est d’environ un mois pour les valeurs maximales.

III.1.2 Paramètres environnementaux le long de profil bathymétrique

Les graphiques des figures III.3 et III.4 représentent respectivement l’évolution bathymétrique des moyennes de la lumière au-dessus de la canopée de l’herbier (1m, 8m, 18m, 27m, et 34m de profondeur) et de la température à l’interface eau-sédiment. Pour une meilleure lisibilité des données, les moyennes journalières ont été regroupées par période mensuelle.

A chaque profondeur, l’intensité lumineuse suit un cycle saisonnier avec des valeurs maximales en été et des valeurs minimales en hiver. En fonction de la profondeur, les valeurs moyennes de l’intensité lumineuse diminuent rapidement, passant d’une moyenne de 38 689 lux mesurée en mai 2015 à 1m de profondeur, à une moyenne de 4 113 lux mesurée en juillet 2015 à 35m de profondeur. Les valeurs minimales hivernales diminuent également à ces mêmes profondeurs, passant de 2 519 lux à 347 lux en Février 2016.

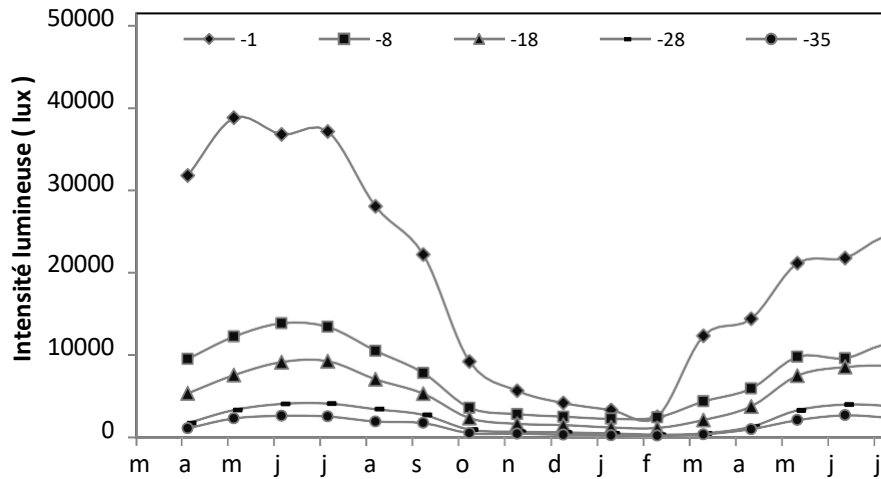


Figure III.3. Evolutions saisonnières et bathymétriques des moyennes mensuelles (des valeurs journalières moyennes ont été moyennées) de l'intensité lumineuse, à 1, 8, 18, 28, et 35m de profondeur au-dessus de la canopée dans l'herbier de posidonie à Stareso (Corse, France).

Comme la lumière, la température diminue avec la profondeur et suit un cycle saisonnier à chaque profondeur. Les valeurs maximales des moyennes de température diminuent, passant de 26.20°C en juillet à 3m de profondeur à 19.82°C à 37m de profondeur en septembre 2015. La même valeur minimale de température est mesurée à toutes les profondeurs en mars 2016, soit 14.02°C.

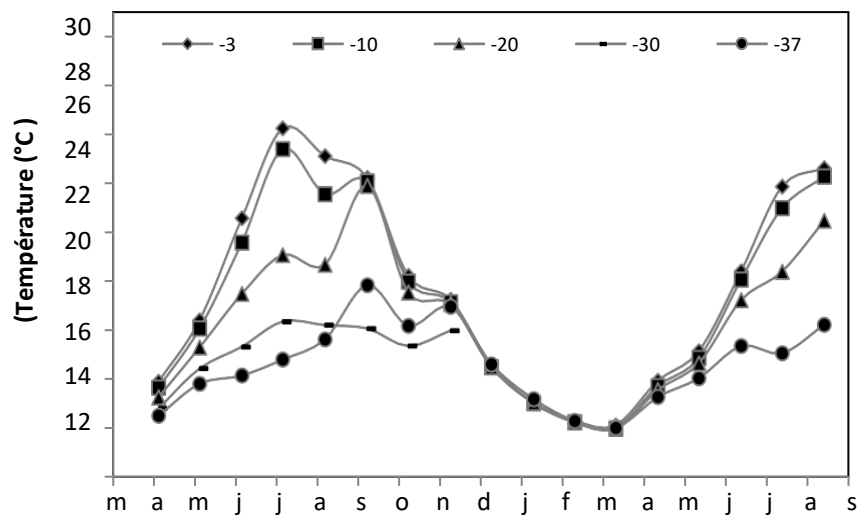


Figure III.4. Evolutions saisonnières et bathymétriques des moyennes mensuelles (des valeurs journalières moyennes ont été moyennées) de la température à 3, 10, 20, 30, et 37m de profondeur à l'interface eau-sédiment dans l'herbier de posidonie à Stareso (Corse, France).

III.1.3. Paramètres biométriques du suivi saisonnier à 10 m de profondeur

Dans l'ensemble, les paramètres biométriques représentés dans la Figure III.5 marquent des pics estivaux et des minima en hiver. Le maximum de biomasse foliaire a été mesuré en juillet 2015, avec une valeur de $1.75 \text{ g}_{\text{ps}} \cdot \text{faisceau}^{-1}$. Son minimum ($0.57 \text{ g}_{\text{ps}} \cdot \text{faisceau}^{-1}$) a été mesuré en décembre 2015. La biomasse des épiphytes suit une évolution similaire à celle des feuilles, avec un pic de $0.43 \text{ g}_{\text{ps}} \cdot \text{faisceau}^{-1}$ en juillet 2015 et un minimum de $0.01 \text{ g}_{\text{ps}} \cdot \text{faisceau}^{-1}$ en novembre 2015. La contribution de la biomasse des épiphytes à la biomasse totale de la canopée passe de 29,4% en été à 4,4% en automne et en hiver. La surface foliaire maximale est atteinte en été avec 372 cm^2 , tandis que les valeurs minimales ont été mesurées en automne et en hiver avec un minimum de 127 cm^2 en octobre 2015. La longueur maximale des feuilles suit les mêmes variations saisonnières avec un minimum de 34 cm et un maximum de 98 cm. Les maxima et les minima du coefficient A se situent respectivement en juillet 2015 et en janvier 2016.

La surface foliaire maximale est atteinte en été avec 372 cm^2 , tandis que les valeurs minimales ont été mesurées en automne et en hiver avec un minimum de 127 cm^2 en octobre 2015. La longueur maximale des feuilles suit les mêmes variations saisonnières avec un minimum de 34 cm et un maximum de 98 cm. Les maxima et les minima du coefficient A se situent respectivement en juillet 2015 et en janvier 2016.

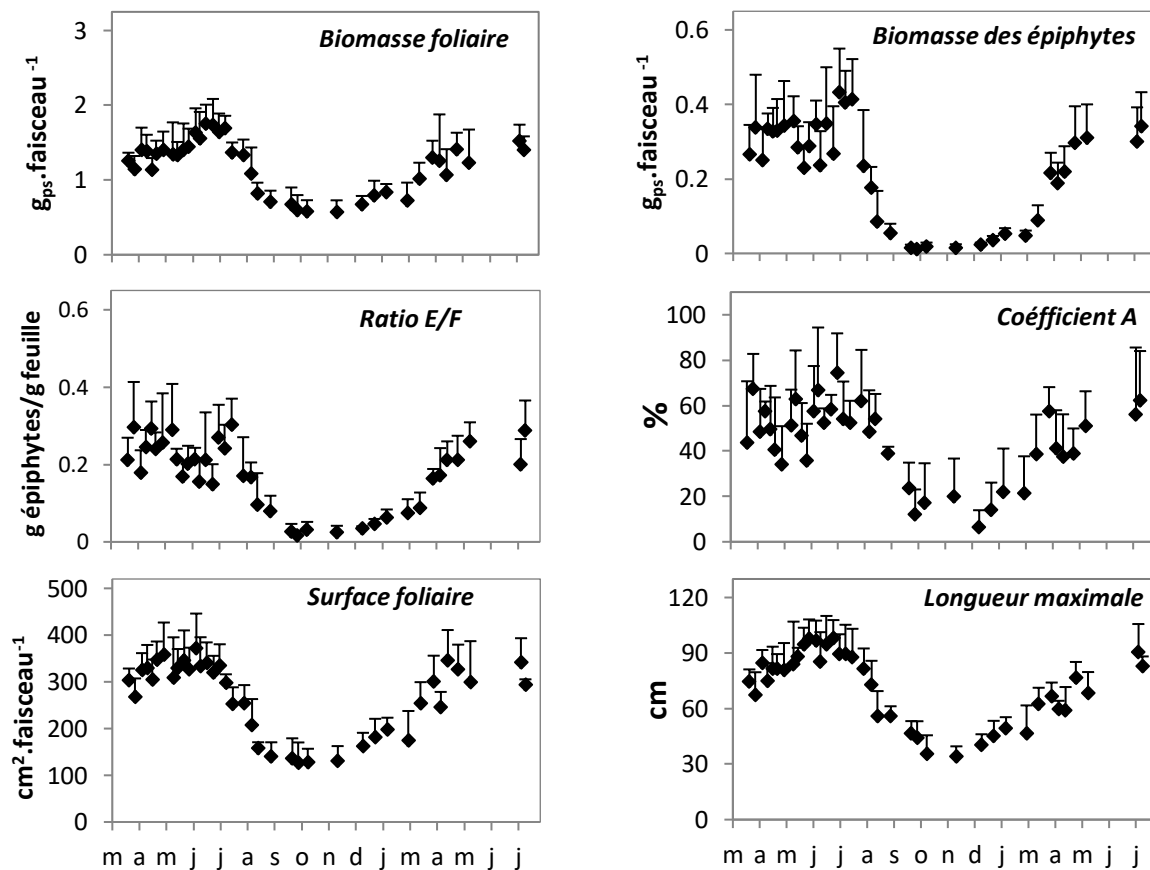


Figure III.5. Evolutions saisonnières des paramètres biométriques des faisceaux de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n=6, moyennes + écart-type) collectés à 10 m de profondeur, entre 15 avril 2015 et 12 juillet 2016, dans l'herbier de posidonie en face de la Stareso (Corse, France).

III.1.4. Paramètres biométriques le long de profil bathymétrique

La figure III.6 illustre l'évolution des paramètres biométriques des faisceaux de posidonies entre 3 et 36 m de profondeur en juin-juillet 2015.

Les résultats indiquent que le poids sec des feuilles et des épiphytes, la longueur maximale des feuilles et la surface foliaire atteignent un pic à 10m de profondeur. En revanche, le coefficient A et l'indice foliaire des feuilles adultes et intermédiaires sont maximaux à 3m de profondeur, avec des valeurs respectives de 69 % et de 16791 m².m⁻², puis diminuent avec la profondeur. Le nombre de feuilles par faisceau est maximal à 20m de profondeur, soit 7 feuilles.faisceau⁻¹.

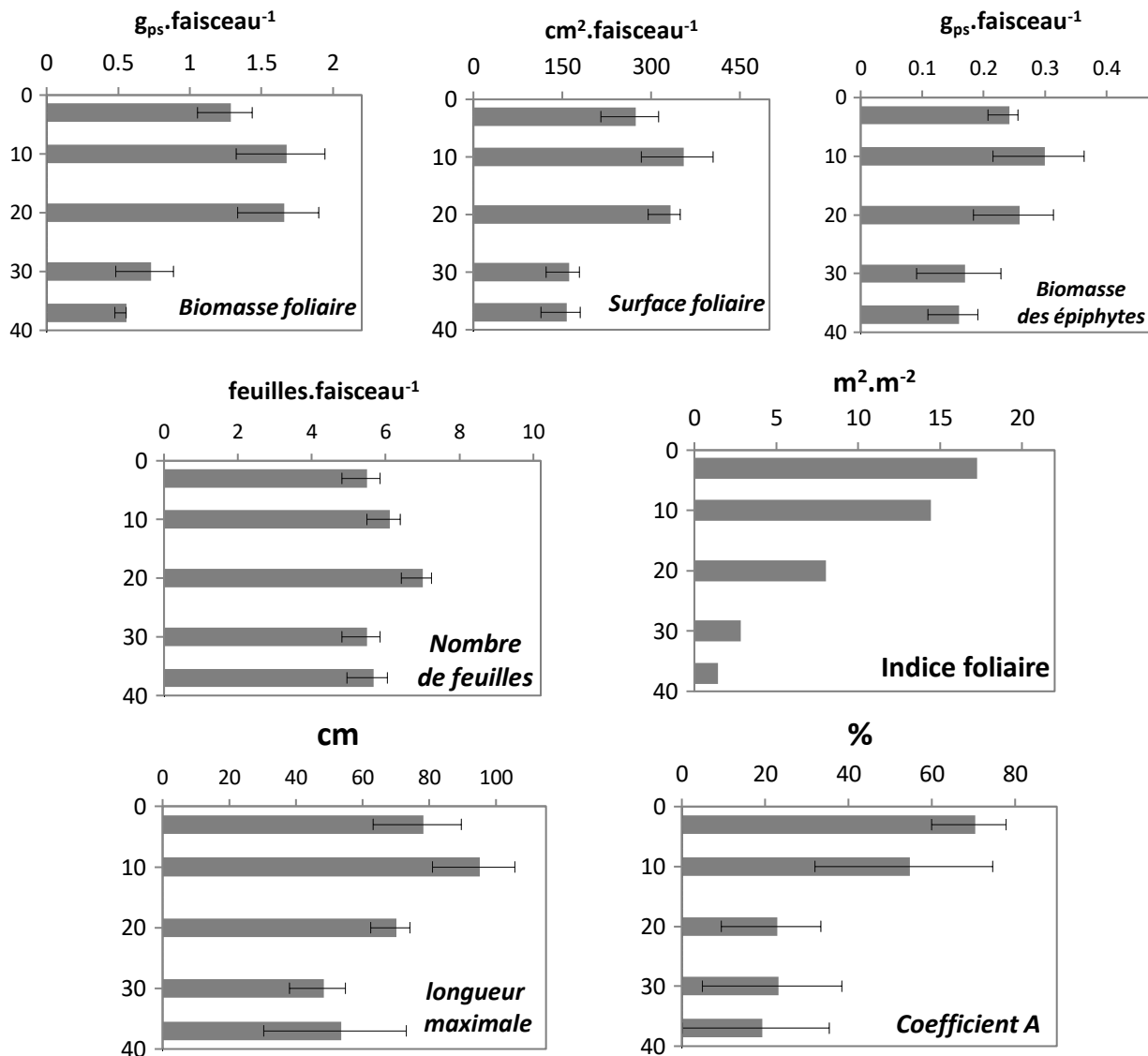


Figure III.6. Evolutions bathymétriques des paramètres biométriques des faisceaux de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (moyennes ± écart-type) collectés entre 3 et 36m de profondeur, entre 15 avril 2015 et 12 juillet 2016, dans l'herbier en face de la Stareso (Corse, France). Densité des faisceaux par profondeur (en faisceau.m²) = 636 (à -3m), 407 (à -10m), 235 (à -20m), 158 (à -29m selon les données de Richir J.), 66 (à -36m selon Pergent., 2009).

III.2. Concentrations des ETs dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile

III.2.1. Concentrations des ETs entre Stareso et Plateau des Chèvres

Les concentrations des 16 ETs (Se, As, Co, Cd, Ni, Zn, Mo, V, Ag, Bi, Fe, Mn, Cr, Al, Pb, Cu) dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, échantillonnés de manière saisonnière et pluriannuelle, ont été regroupées en fonction des variations de leurs profils de concentration.

A Stareso, les concentrations de Se ($0.16-0.26 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$), Co ($0.15-0.20 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) et Ag ($0.42-1.27 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) montrent des niveaux de concentrations relativement similaires entre les années. Au Plateau des Chèvres, les concentrations de Se ($0.19-0.39 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) atteignent leurs pics en 2009, tandis que celles de Co ($6.8-9.37 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) et de Ag ($6.8-9.37 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) ne montrent pas de grandes différences entre les trois années sur le même site.

Les concentrations d'As ($0.57-1.27 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) à Stareso sont maximales en 2008, diminuent en 2009 et atteignent des valeurs minimales en 2010, contrairement au Ni ($29.14-50.56 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$). Au Plateau des Chèvres, les concentrations de As ($0.50-1.15 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) suivent la même évolution qu'à Stareso, tandis que les concentrations de Ni ($26-56 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) ne diffèrent pas beaucoup entre les trois années.

Les concentrations de Mo ($0.7-1.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$), V ($0.32-0.92 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) et Bi ($0.003-0.037 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) montrent des valeurs maximales en 2009 par rapport aux deux autres années à Stareso, tandis qu'au Plateau des Chèvres, les concentrations de Mo ($0.7-1.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) montrent des petites différences entre les trois années, et celles de V ($0.42-1.27 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) et Bi ($0.01-0.04 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) atteignent leurs maxima en 2008.

A Stareso, les concentrations de Zn ($67.83-108.62 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) et Cd ($1.10-1.60 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{ps}}^{-1}$) ont atteint des niveaux élevés en 2010, avec une augmentation notable pour Cd en 2009. Ces deux éléments enregistrent leurs pics en 2008 au Plateau des Chèvres.

En ce qui concerne les concentrations de As, Se, Ni, Ag, V, Bi et Zn, les valeurs maximales sont observées au Plateau des Chèvres, tandis que les concentrations en Cd et Mo sont plus élevées à Stareso. Les concentrations en Co sont relativement similaires entre les deux sites (Figure III.7 et Figure III.8)

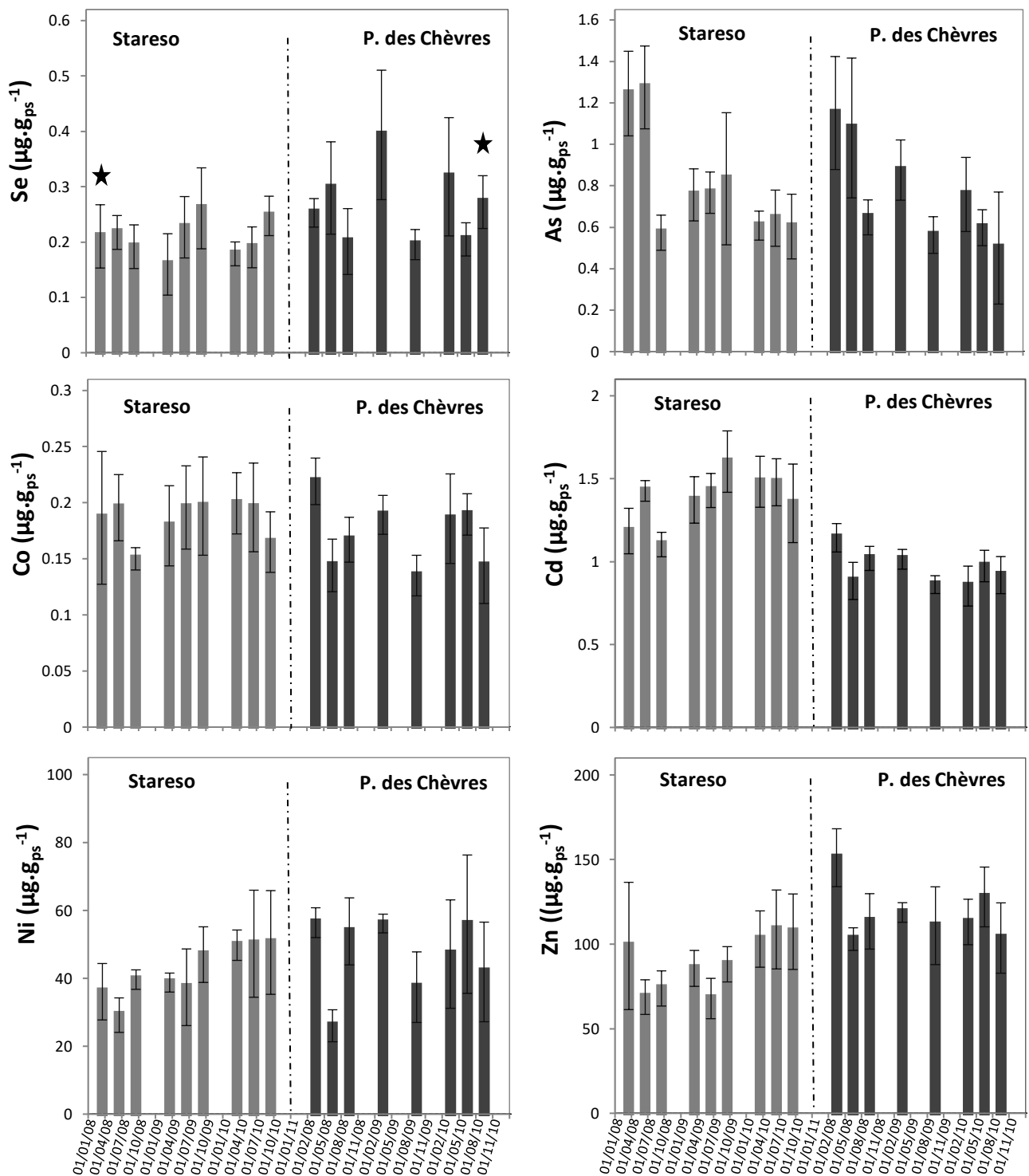


Figure III.7. Variations saisonnières (mars, juin et novembre) et multi annuelles (2008, 2009 et 2010) des concentrations de Se, As, Co, Cd, Ni, Zn, dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 9) (moyenne \pm écart-type) échantillonnées à 10m de profondeur en face de Stareso (Calvi, Corse, France) et sur le Plateau des Chèvres (Marseille, France). ★ représente les concentrations inférieures à LQ

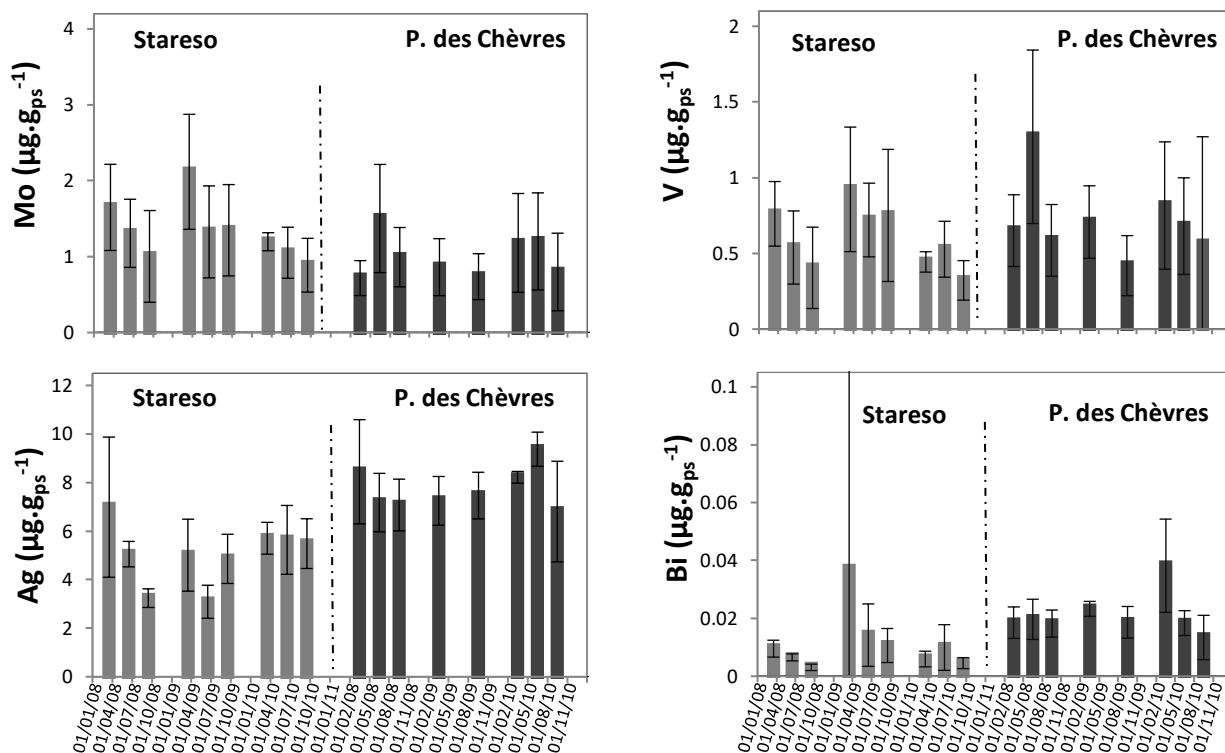


Figure III.8. Variations saisonnières (mars, juin et novembre) et multi-annuelles (2008, 2009 et 2010) des concentrations de Mo, V, Ag et Bi dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 9) (moyenne ± écart-type) échantillonnées à 10 m de profondeur en face de Stareso (Calvi, Corse, France) et sur le Plateau des Chèvres (Marseille, France).

À Stareso, les concentrations de Fe (53-126 µg.g_{ps}⁻¹), Cr (0.11-0.56 µg.g_{ps}⁻¹), Mn (4-6 µg.g_{ps}⁻¹) et Al (55-188 µg.g_{ps}⁻¹) diminuent en 2008, puis augmentent jusqu'à leurs valeurs les plus élevées en 2009, avant d'atteindre leurs minima en 2010. Au Plateau des Chèvres, ces éléments (Fe : 68-186 µg.g_{ps}⁻¹), (Cr : 0.19-0.56 µg.g_{ps}⁻¹), (Mn : 4.10-6.12 µg.g_{ps}⁻¹), Al (55-188 µg.g_{ps}⁻¹) diminuent en 2008 et marquent leurs concentrations maximales en 2009 et 2010.

À Stareso, les concentrations de Pb (0.18-0.49 µg.g_{ps}⁻¹) sont plus élevées en 2008 et 2009, puis diminuent en 2010, or au Plateau des Chèvres, Pb (0.30-1.01 µg.g_{ps}⁻¹) affiche des concentrations plus faibles en 2008 et 2009, et atteint son maximum en 2010.

Pour le Cu (7.39-11.65 µg.g_{ps}⁻¹), les concentrations les plus élevées sont observées en 2008 et 2010 à Stareso, et diminuent en 2009. Au Plateau des Chèvres, les concentrations en Cu (11.4-14.8 µg.g_{ps}⁻¹) ne présentent pas de grandes différences entre les trois années. À titre de comparaison, les maxima de concentration d'Al et de Mn sont atteints à Stareso, tandis que le Plateau des Chèvres présente des concentrations plus élevées en Cr, Pb et Cu (Figure III.9).

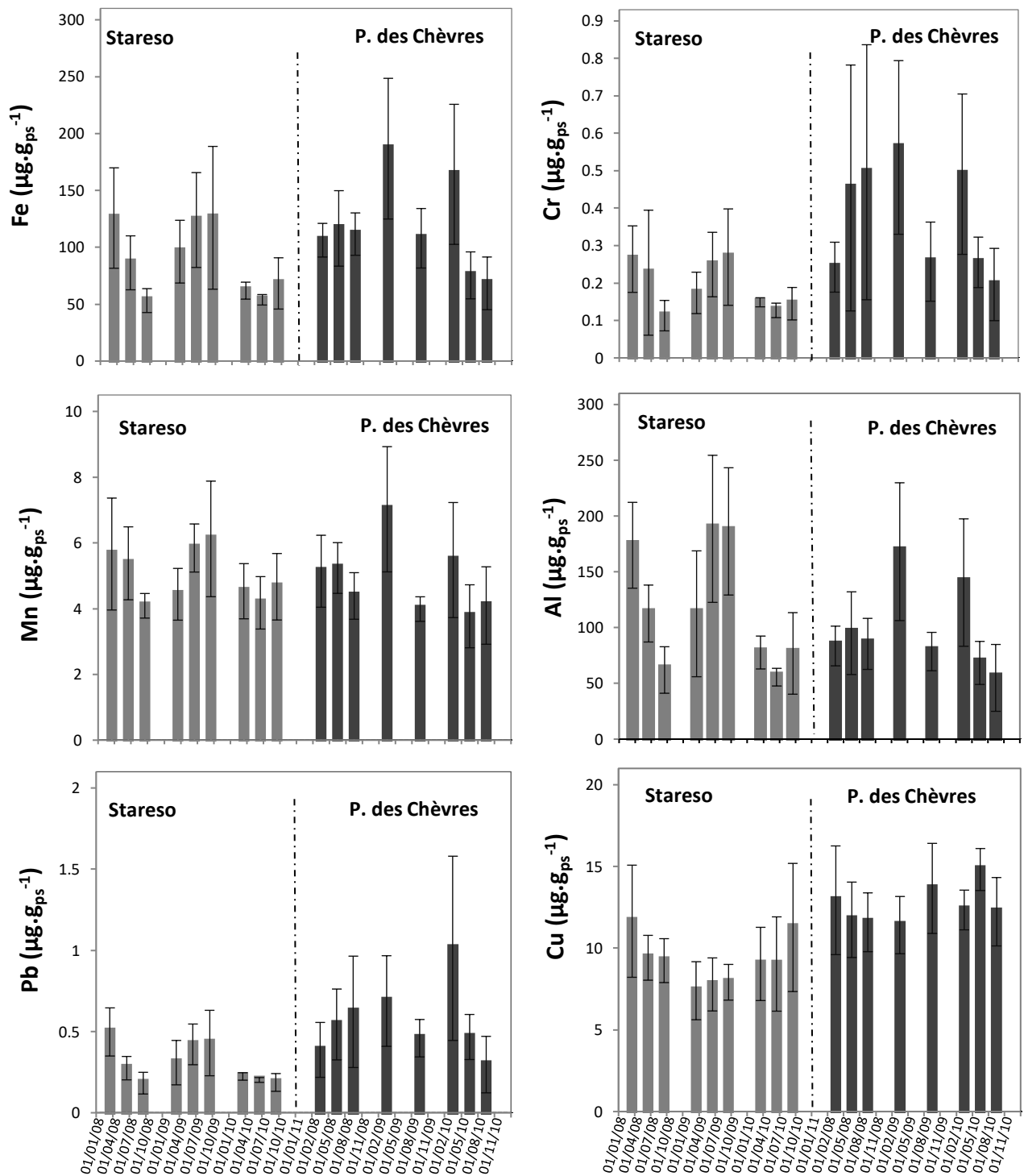


Figure III.9. Variations saisonnières (mars, juin et novembre) et multi annuelles (2008, 2009 et 2010) des concentrations de Fe, Cr, Mn, Al, Pb et Cu dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 9) (moyenne \pm écart-type) échantillonnées à 10 m de profondeur en face de Stareso (Calvi, Corse, France) et sur le Plateau des Chèvres (Marseille, France).

III.2.2. Concentrations des ETs du suivi spatial

Les 16 éléments traces analysés dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, prélevés à des endroits différents, sont classés en fonction de la variation spatiale de leurs concentrations. Une première observation permet de distinguer deux grands groupes :

- Les éléments à grande variation spatiale : Les concentrations d'Al, Ni, As, Bi, Zn, Mo, V, Fe, Cr et Se, montrent des fluctuations importantes entre les stations. Les concentrations les plus élevées de Fe, Al, Cr, Se et V sont observées aux stations Emiss et Aqua, tandis que celles de Ni et d'As sont mesurées à Star à une profondeur de 20m et 30m, et à PB. Le Bi et Zn marquent des pics à Emiss tandis que le Mo atteint son maximum à Star à une profondeur de 30m. En fonction de la profondeur, les concentrations des éléments Al, As, Zn, Mo, V, Fe, Cr augmentent, alors que celles de Bi et Ni diminuent (Figure III.10 et Figure III.11).

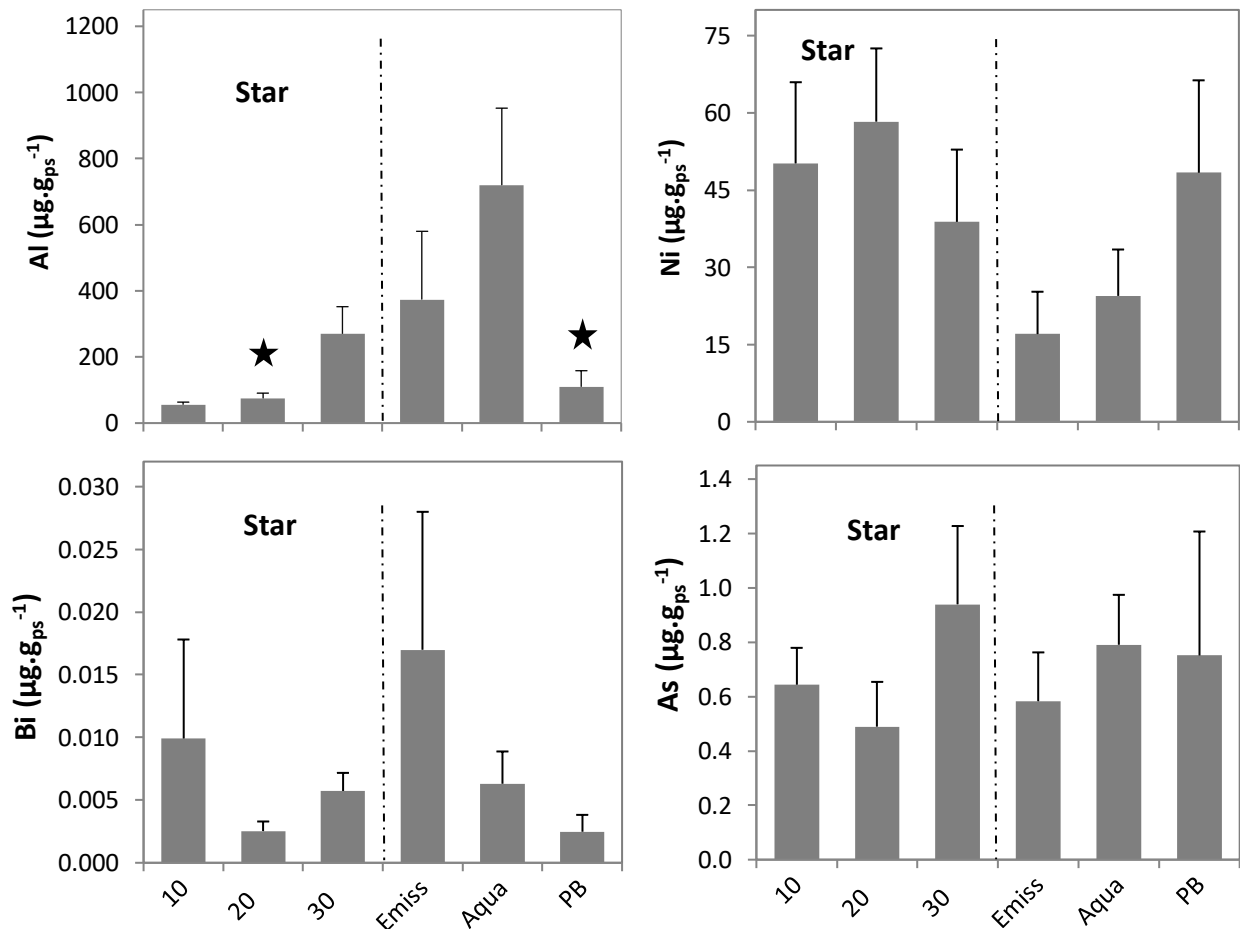


Figure III.10. Concentrations de Al, Ni, Bi et As, dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 11) (moyenne+écart-type) échantillonnées en juin 2010 aux différentes stations : Star (Stareso à 10, 20 et 30m de profondeur), PB (Punta Bianca), Emiss (Emissaire de Calvi) et Aqua (Cage aquacole au large de baie de Calvi). ★ représente les concentrations inférieures à LQ.

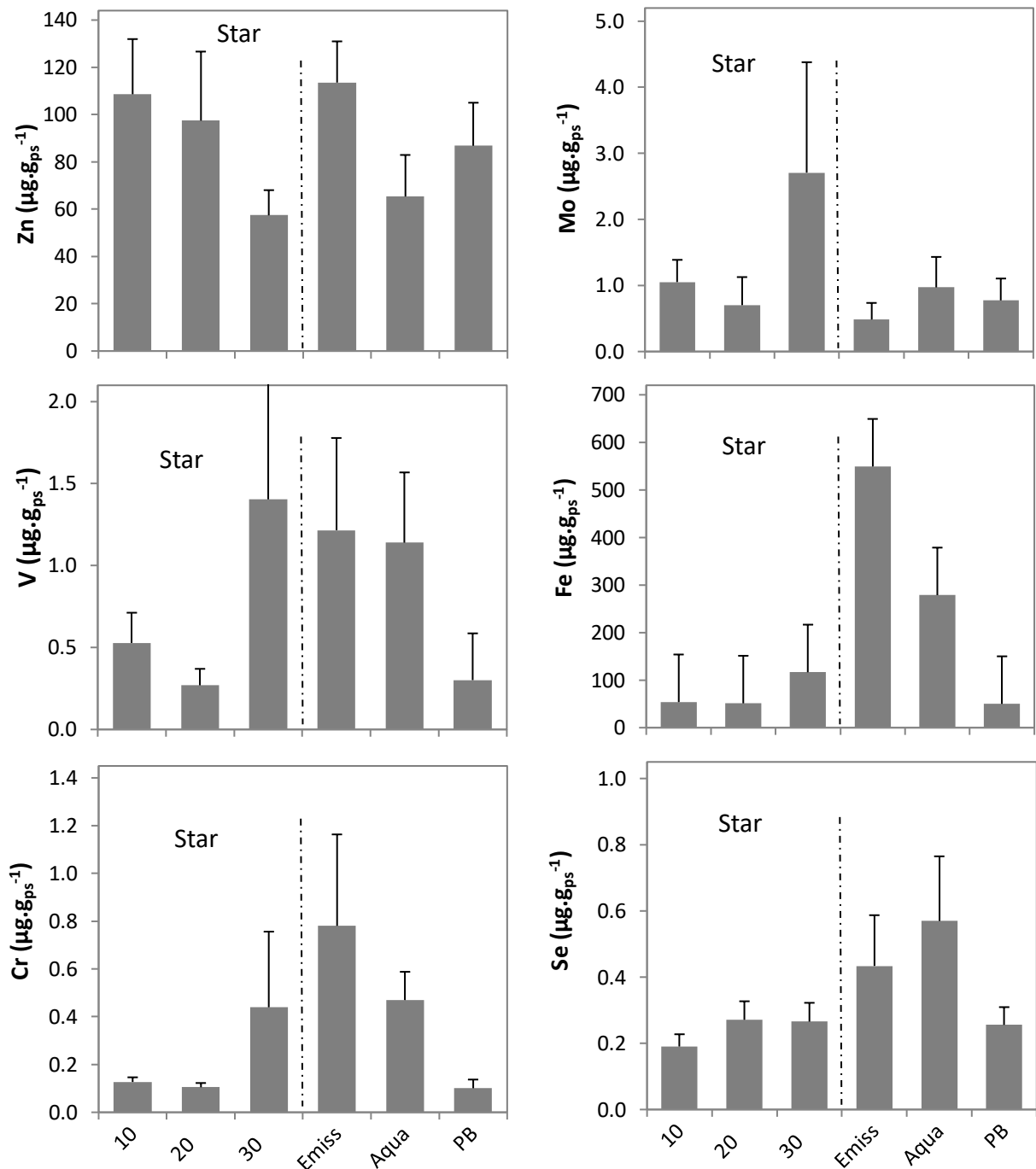


Figure III.11. Concentrations de Zn, Mo, V, Fe, Cr et Se dans les rhizomes *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 11) (moyenne + écart-type) échantillonnées en juin 2010 aux différentes stations : Star (Stareso à 10, 20 et 30m de profondeur), PB (Punta Bianca), Emiss (Emissaire de Calvi) et Aqua (Cage aquacole au large de baie de Calvi)

- Les éléments à petite variations spatiales : Ce groupe comprend les éléments Ag, Mn, Cd, Co, Cu et Pb. Les fluctuations de leurs concentrations entre les stations sont peu importantes. Les concentrations de Mn sont légèrement plus élevées à Emiss et Aqua.

La station Star présente un léger pic de concentration pour Ag, Cd à et Co respectivement à 30m, 10m et 20m de profondeur, tandis que le Pb et le Cu atteignent leurs concentrations maximales à Emiss. Les concentrations de Cu, Cd et Co diminuent légèrement avec la profondeur à Star et celles de Ag, Mn, et Pb augmentent (Figure III.12).

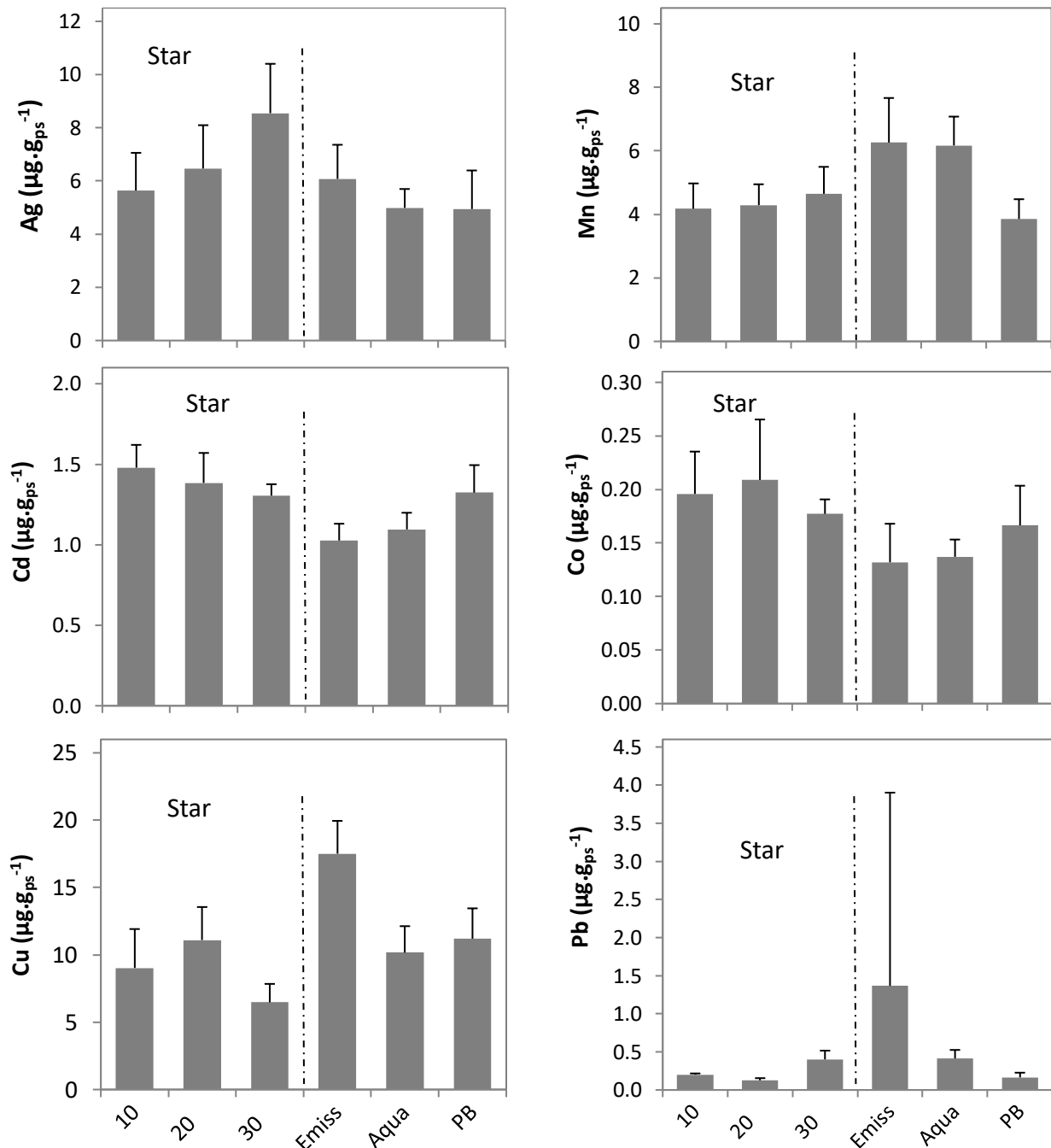


Figure III.12. Concentrations de Ag, Mn, Cd, Co, Cu et Pb dans les rhizomes *Posidonia oceanica* (L.) Delile (n= 5 à 11) (moyenne+écart-type) échantillonnées en juin 2010 aux différentes stations : Star (Stareso à 10, 20 et 30m de profondeur), PB (Punta Bianca), Emiss (Emissaire de Calvi) et Aqua (Cage aquacole au large de baie de Calvi).

III.2.3. Corrélation entre les différents ETs

La matrice de corrélation entre les éléments traces (Figure III.13) met en évidence des relations de dépendance entre plusieurs éléments.

On observe des fortes corrélations positives entre Fe et les éléments Al, Mn, Se, Pb, entre Al et les éléments Be, Mn, et entre le Mo et les éléments V et Sb. On observe ainsi des corrélations positives modérées entre Al et les éléments Se, Pb, V, Sb, et Co, ainsi que entre Pb et les éléments V, Sb, Ag, et Cr. En revanche, des relations négatives sont également observées, telles que la corrélation modérée entre Cd et les éléments Cu et Ag.

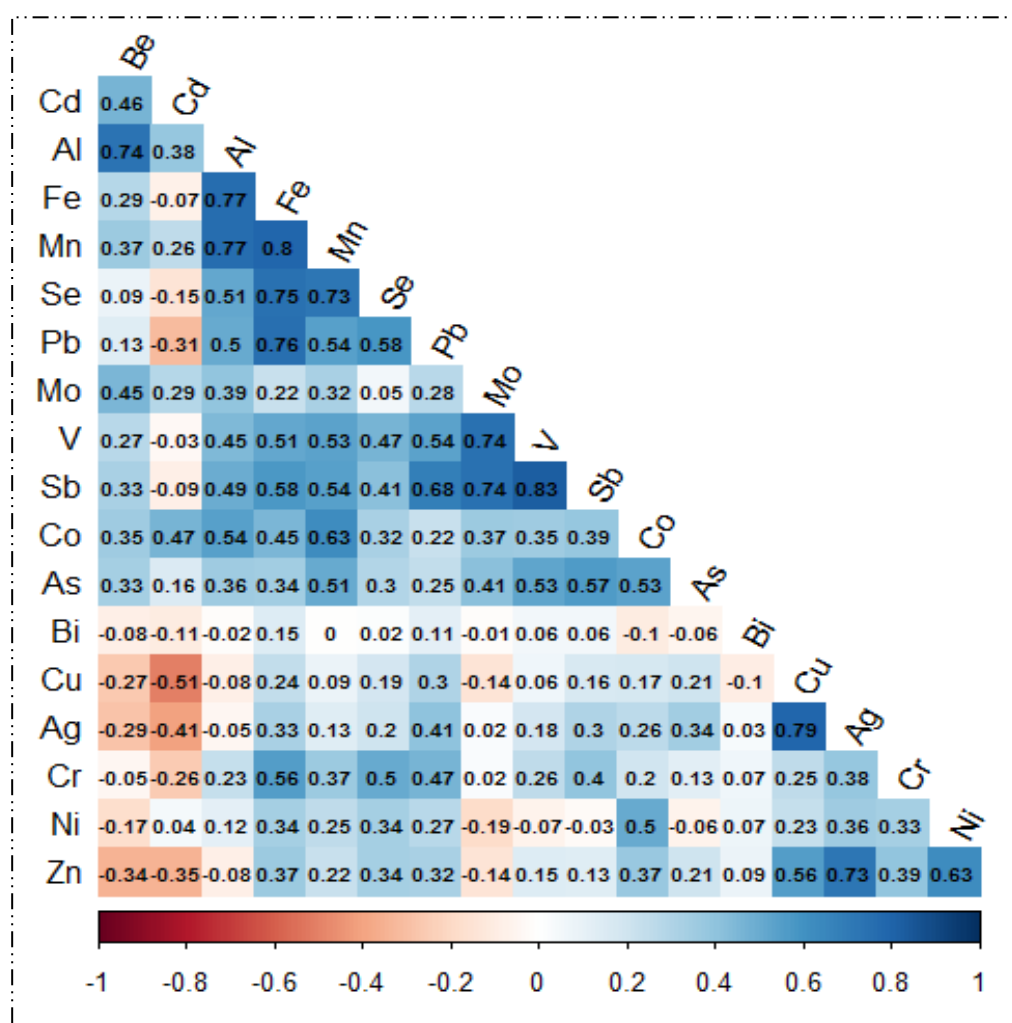


Figure III.13. Matrice de corrélation de Pearson entre les éléments traces analysés dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile échantillonnées en juin 2010 aux différentes stations : Star (Stareso à 20 et 30m de profondeur), PB (Punta Bianca), Emiss (Emissaire de Calvi) et Aqua (Cage aquacole au large de baie de Calvi), et de façon saisonnière (mars, juin et novembre) et multi annuelles à 10 m de profondeur en face de Stareso (Calvi, Corse, France) et sur le Plateau des Chèvres (Marseille, France)

CHAPITRE IV.

DISCUSSION

IV. DISCUSSION

IV.1. Variations des paramètres environnementaux et biométriques

IV.1.1. Variations des paramètres environnementaux

Les données de lumière et de température sont directement liées à l'ensoleillement, mais également à d'autres facteurs comme la turbidité et les tempêtes, ce qui explique les valeurs maximales de ces paramètres environnementaux observées en été en raison de l'augmentation de l'ensoleillement et de la rareté ou de l'absence de turbidité et de tempête, contrairement à l'hiver. Le pourcentage de la lumière au-dessus de la canopée atteignant l'interface eau-sédiment (10% en été et 25% en hiver en moyenne) traduit l'effet d'ombrage par les faisceaux de feuilles d'herbier. Le coefficient d'extinction des eaux de la Baie de la Revellata est faible en surface et augmente avec la profondeur, avec des valeurs plus élevées en hiver et au printemps, correspondant à des fréquences de tempêtes plus élevées.

Le décalage entre les maxima et les minima de température et d'intensité lumineuse est dû à l'inertie thermique des masses d'eau, qui induit une augmentation et une diminution plus tardive de la température de la colonne d'eau. Il en va de même pour la stratification progressive de la masse d'eau et de la différence de régime de température, qui diminue en fonction de la profondeur.

De manière générale, les valeurs de température obtenues et leurs variations au cours de l'année sont conformes à celles observées par Gobert en 2002, ainsi que dans des sites similaires tel que Port Cros (Augier et al., 1980), en Espagne (Sanchez-Lizaso., 1993) et en Algérie (Boumaza., 1995 ; Chahrour., 2013).

IV.1.2. Cycle saisonnier et variation bathymétrique des paramètres biométriques

Les variations saisonnières de la biomasse foliaire et des épiphytes sont influencées par différents facteurs environnementaux, tels que la lumière, la température de l'eau et le développement des espèces encroûtantes (Cinelli et al., 1984). En effet, la lumière est un facteur limitant pour la production primaire des plantes (Alcoverro et al., 1995) et, par conséquent, pour la croissance des feuilles et des épiphytes. De plus, la température de l'eau a un impact direct sur la croissance et la survie des organismes présents dans l'écosystème marin (Lassauque., 2009), y compris les plantes aquatiques. Les épiphytes ont tendance à se développer sur les feuilles longues et anciennes, ce qui explique leur pic estival de biomasse. En automne, la chute de ces feuilles anciennes entraîne une diminution rapide et importante de la biomasse des feuilles et des épiphytes. Ces variations saisonnières de la biomasse foliaire et des épiphytes ont été observées dans d'autres études similaires menées dans d'autres sites (Boumaza, 1995; Gobert, 2002).

Le cycle saisonnier de la surface foliaire dépend de la variation de la longueur et du nombre des feuilles, qui est liée au rythme saisonnier de leur chute et de leur formation. En effet, selon Wittmann (1984), la croissance des feuilles est ralentie en automne, tandis que le printemps et l'été sont les périodes les plus favorables au développement végétatif de la plante, d'où les valeurs élevées des longueurs maximales des feuilles observées à ces périodes.

Les variations du coefficient A dépendent de l'action de l'hydrodynamisme et du broutage par des herbivores, tels que l'oursin *Paracentrotus lividus* qui assimile les épiphytes des feuilles et le sparidé *Sarpa salpa* qui se nourrit directement des feuilles de *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Les valeurs élevées de ce coefficient en été reflètent l'importance de la pression de broutage à cette saison (Wittmann et al., 1981; Pergent., 1987; Gobert., 2002).

En conclusion, les variations des différents paramètres phénologiques sur la période allant d'avril 2015 à juillet 2016 montrent clairement l'influence des conditions hydrodynamiques, de l'ensoleillement et de la pression de prédation dans la baie de la Revellata (Calvi).

La diminution des paramètres biométriques tels que la biomasse des faisceaux, des épiphytes, l'indice foliaire, la longueur maximale des feuilles, ainsi que d'autres paramètres qui en découlent tels que le rapport E/F, la surface foliaire et le coefficient A, mesurés entre 3m et 37m de profondeur est lié à la réduction de la lumière et la température (Pirc., 1985). Les valeurs maximales sont conformes à ce qui a été décrit par Gobert (2002), qui révèle les maximas à 10m de profondeur. Ces schémas de variation ont déjà été signalés par différents auteurs (Cinelli et al., 1984 ; Pergent., 1987 ; Sanchez-lizazo.,1993 ; Boumaza., 1995).

IV.2. Variations des concentrations en ETs dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile

L'assimilation des ETs dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile se fait par deux voies: l'absorption par les feuilles à partir de la colonne d'eau puis la translocation vers les rhizomes, et l'absorption par les racines dans l'eau interstitielle (Luy et al., 2012). Par conséquent, il est important de prendre en compte l'état et la nature des sédiments marins dans la discussion des résultats obtenus.

IV.2.1. Concentrations des éléments traces entre Stareso et Plateau des Chèvres :

La comparaison de nos résultats avec ceux de Richir et Gobert (2014) sur les feuilles de posidonies révèle que certains éléments ont une affinité à s'accumuler dans les rhizomes plutôt que dans les feuilles. Cela confirme également ce que Richir et al. (2013) ont révélé dans leur étude expérimentale de la compartimentalisation des ETs dans les tissus de *Posidonia oceanica* (L.) Delile.

Les concentrations des éléments traces (ETs) dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile varient d'une saison à l'autre selon le cycle éco-physiologique de la plante, comme observé pour Mn, V, Cr et Mo qui augmentent en mars et diminuent en septembre. Cependant, cette variation saisonnière n'est pas observée au Plateau des Chèvres, un milieu anthropisé (Richir et al., 2013). Les épisodes de pluie importante en hiver peuvent contribuer à cette différence de concentration des ETs d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre (Pinazo et al., 2013), en raison d'un apport rapide et important en des ETs en hiver qu'en été.

La distribution des éléments traces dans les zones étudiées est influencée par divers facteurs, notamment les caractéristiques du sédiment. L'herbier en face de Stareso présente un sédiment grossier composé de détritiques côtiers, accompagné d'une faible fraction de sables fins et d'une fraction fine inférieure à 10% (Pelaprat, 2010; Jousseume et al., 2014). Cela explique probablement les concentrations relativement faibles d'éléments traces dans cette zone, en raison des faibles affinités des ETs pour ce type de sédiment.

Le fond du Plateau des Chèvres est également constitué de sable moyen à grossier (Communication personnelle de Richir J), ce qui souligne l'importance de connaître la provenance des éléments traces dans cette zone. Les éléments traces dans les zones de Stareso et du Plateau des Chèvres proviennent de sources naturelles et anthropiques. Cependant, les sources anthropiques sont plus importantes dans le Plateau des Chèvres. Selon le contrat de baie de la métropole marseillaise (2012), le rejet de Cortiou a un impact significatif sur le milieu du Plateau des Chèvres. Une étude menée sur la période 2007-2010 a révélé un impact marqué sur les sédiments et les peuplements benthiques, avec une contamination chimique confirmée du Plateau des Chèvres, notamment à proximité de l'émissaire de Cortiou. En outre, plusieurs anciens sites industriels pollués sont implantés sur le littoral Nord et Sud de Marseille, générant encore des pollutions diffuses dans les sédiments marins par percolation et lessivage des sols.

Selon Romeo (1995), la Stareso est considérée comme un site non contaminé. De plus, les faibles niveaux des éléments (Mn, Co, Ni, Cu et Zn) déterminés ne semblent pas être déficients pour la croissance de *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Certains éléments à Calvi proviennent des processus naturels tels que la remontée des eaux riches profondes (cas du Cd) ou le lessivage du bassin versant (cas de Se).

Au Plateau des Chèvres, les valeurs élevées des concentrations en éléments traces peuvent être d'origine géologique (cas de Se) ou être dues aux anciennes activités industrielles (cas de As).

D'autres éléments peuvent être liée à des activités anthropiques spécifiques telles que l'agriculture (cas de Mo), l'industrie (cas de V, Pb, Ni, Cu), la présence de ports importants et d'agglomérations urbaines (cas de Bi), la combustion des déchets urbaines et les effluents des stations d'épuration (cas du Ag). D'ailleurs, les différentes corrélations trouvées entre les éléments traces analysés suggèrent que les sources de contamination sont communes pour les éléments considérés. L'absence de corrélation est probablement due à la spécificité de ces sources (Richir et al., 2015).

IV.2.2. Variations spatiales des concentrations des ETs en baie de Calvi

La différence des faciès sédimentaires entre les stations peut fortement conditionner le degré d'accumulation des éléments traces dans les rhizomes. En effet, un sédiment plus meuble et plus vaseux, comme celui présent au-dessous de Emiss et Aqua, peut favoriser l'accumulation des contaminants. Jousseume et al (2014) soulignent la diminution de la fraction grossière près de l'émissaire de Calvi. À Star, le sédiment est plus grossier et la présence de caillasse compose le fond de la PB, empêchant ou réduisant l'adsorption des contaminants.

À Emiss, les concentrations élevées de certains éléments, comme Se, V et Bi, sont principalement dues aux rejets domestiques provenant de la ville de Calvi via la station d'épuration. D'autres éléments tels que Fe, sont probablement issus de la station elle-même lors des processus de traitement.

L'activité aquacole est également connue pour entraîner une eutrophisation du milieu liée aux déjections des poissons et la sédimentation de la nourriture non consommée. Les aquaculteurs ont souvent tendance à sur-nourrir les poissons pour assurer une croissance plus rapide (Jousseume et al., 2014). Son impact reste limité sur certains éléments traces tel qu'Al, V et Se. Toutefois, selon Sanz- Lázaro et al. (2011), le Cr et le Pb ne sont pas des polluants dérivés de l'aquaculture.

Malgré sa situation à l'extérieur de la baie, la Punta Bianca enregistre des valeurs similaires à élevées de concentrations de quelques éléments, traduisant l'effet faible de confinement joué par la Baie (Richir et Gobert., 2014). De nombreux travaux menés à la Stareso montrent que l'écosystème à ce niveau est dans un bon état de préservation (e.g. Gobert et al., 2009 ; Goffart et al., 2002), ce qui suggère que les apports temporaires du bassin versant sont l'origine de leurs concentrations plus au moins élevés à ce site. La diminution des concentrations de la plupart des éléments en fonction de la profondeur peut s'expliquer par la dilution progressive des apports terrigènes.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nos résultats de biométrie et d'analyse des éléments traces confirment que les herbiers et les sédiments de la baie de Calvi sont en bon état de santé et sont peu exposés aux pressions anthropiques. Cependant, cela n'est pas tout à fait le cas au Plateau des Chèvres. Ils démontrent également la pertinence de l'utilisation de la *Posidonia oceanica* (L.) Delile comme bio indicateur de la contamination chimique des sédiments dans les écosystèmes côtiers. En effet, les concentrations mesurées dans cet organisme montrent les différences significatives de teneurs entre un site contaminé (Plateau des Chèvres) et un site protégé (Stareso), ainsi que les différences entre les stations étudiées à petite échelle spatiale présentant des conditions de pollution globalement faibles (Baie de Calvi). Ce bio indicateur permet de faire du biomonitoring lors d'études fines à petite échelle spatiale. Cependant, il est important de prendre en compte les caractéristiques locales telles que la géochimie, la sédimentologie et les paramètres hydrodynamiques car il peut être difficile de distinguer la source de contamination en se basant uniquement sur des bio-indicateurs.

Des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer la distribution des éléments traces dans les herbiers marins méditerranéens, en prenant en compte les caractéristiques des sédiments (géologie et physico-chimie), la composition détaillée des sédiments côtiers et l'influence de la courantométrie sur la distribution et les dépôts des polluants. Il est également important de mettre en place un suivi saisonnier ou annuel de la qualité de l'herbier, en quantifiant et en qualifiant les eaux usées et fluviales se jetant dans les côtes. De plus, les interactions entre les éléments traces analysés peuvent faire l'objet d'une étude plus approfondie pour améliorer nos connaissances sur l'écologie et l'éco-toxicologie de *Posidonia oceanica* (L.) Delile.

Ces informations peuvent être utiles aux gestionnaires de l'environnement pour orienter une surveillance ciblée afin de définir avec précision les sources de pollution anthropique aux échelles spatiales locales. Cette surveillance peut contribuer à l'amélioration du système d'épuration de la ville de Marseille pour réhabiliter le milieu, et maintenir ou même améliorer l'état de conservation de la baie de Calvi. De telles initiatives à l'échelle locale peuvent être un exemple pour agir à l'échelle nationale et internationale.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alcoverro T, Duarte CM, Romero J., 1995. Annual growth dynamics of *Posidonia oceanica* (L.)Delile: contribution of large-scale versus local factors to seasonality. *Mar EcolProgSer*, 120 (1-3) : 203-210
- Augier H., Robert P., Maffre R., 1980. Etude du régime thermique annuel des eaux au niveau des peuplements de Phanérogames marines de la baie de Port-Cros (îles d’Hyères, Méditerranée, France). *Trav. Sci. Parc Nation.Port-Cros*, 6: 69-131.
- Augier H., 2010. Le milieu méditerranéen. In: Guide des fonds marins de Méditerranée écologie, flore, faune, plongée. Delachaux et Niestlé (eds). Paris, France. 456p.
- Bianchi C.N &Morri C., 2000. Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: situation, problems and prospects for future research. *Marine Pollution Bulletin*, 40: 367-376.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L., 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica* (L.)Delile. Ramoge Pub, pp : 1–202.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., et al., 2012. Protection and Conservation of *Posidonia oceanica* (L.) Delile Meadows. RAMOGE and RAC/SPA Publisher, Tunis.
- Boudouresque C.F., Meinesz A., 1982. Découverte de l’herbier de Posidonie. *Cahiers du Parc national de Port-Cros* 4, 79.
- Boumaza.S., 1995. Phénologie,biomasse,lépidochronologie et production primaire de l’herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile de l’anse de Kouali, Tipaza (Algérie).
- Burger J., 2006. Bioindicators: a review of their use in the environmental literature 1970–2005. *Environ. Bioindic*,1: 136–144.
- Callender E., 2003. Heavy metals in the environment - historical trends. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, vol. 9. Elsevier, pp : 67-105.
- Cinelli F., Cormaci M., Furnari G., Mazella L., 1984. Epiphytic macroflora of *P. oceanica* (L.) Delile leaves around the island of Ischia (Gulf of Naples). In: Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. *International Workshop on Posidonia oceanica* (L.)Delile beds, GIS Posidoniepubl, Fr, 1: 91-99.
- Chahrour F., 2013. Etude de la vitalité des herbiers à *Posidonia oceanica* (L.)Delile de la côte ouest algérienne (Cap Carbon et Ain Franin). Thèse de Doctorat, Univ Oran, 178pp
- Cognetti G., 1999. Conservation strategies in the Mediterranean.*AquaticConserv: Mar. Freshw. Ecosyst*, 9: 509–515.

- Cossa D., 1989. A review of the use of *Mytilus* spp. as quantitative indicators of cadmium and mercury contamination in coastal waters. *Oceanologica Acta* 12(4): 417-432.
- Currie L., 1999. Nomenclature in evaluation of analytical methods including detection and quantification capabilities (IUPAC Recommendations 1995). *Analytica Chimica Acta* 391 : 105–126.
- De Los Santos C.B., Vincencio-Rammsy B., Lepoint G., Remy F., Bouma T.J., Gobert S., 2015. Ontogenic variation and effect of collection procedure on leaf biomechanical properties of Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Marine Ecology*. ISSN 0173-9564 : 1-10.
- Fowler J, Cohen L., 1990. Practical statistics for field biology. Open University Press publi. Maidenhead
- Giraud G., 1979. Sur une méthode de mesure et de comptage des structures foliaires de *P. oceanica* (Linnaeus) Delile. *Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille* Fr, 39: 33–39.
- Gobert S., 2002. Variations spatiale et temporelle de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile (Baie de la Revellata-Calvi-Corse). Thèse Doctorat, Univ. Liège.
- Gobert S., Cambridge M.L., Velimirov B., Pergent G., Lepoint G., Bouquegneau J.- M., Dauby P., Pergent-Martini C., Walker D.I., 2006. Biology of *Posidonia*. In: Larkum, A.W.D., Orth, R.J., Duarte, C.M. (Eds.), *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp: 387–408.
- Gobert S., Sartoretto S., Rico-Raimondino V., Andral B., Chery A., Lejeune P & Boissery P., 2009. Assessment Of The Ecological Status Of Mediterranean French Coastal Waters As Required By The Water Framework Directive Using The *Posidonia oceanica* (L.) Delile Rapid Easy Index: PREI. *Marine Pollution Bulletin*, 58 (11): 1727-1733.
- Goffart A., Hecq J.H., Legendre L., 2002. Changes in the development of the winter-spring phytoplankton bloom in the Bay of Calvi (northwestern Mediterranean) over the last two decades : a response to the changing climate? *Marine Ecology Progress Series*, 236 : 45-60 Goldberg E. D., 1975. The mussel watch. *Marine Pollution Bulletin* 6: 111-113.
- Grinzaid E.L., Zil'bershtein K.I., Nadezhina L.S., Yufa B.Y., 1977. Terms and methods of estimating detection limits in various analytical methods. *Journal of Analytical Chemistry USSR* 32: 1678–1684.
- Guendouzi Y., Ghalmi R., Boudjellal M., El morhit M., 2015. Impact des métaux traces sur l'écosystème à *Posidonia oceanica* (L.) Delile dans La Baie d'Alger. *J. Mater. Environ. Sci*, 6 (4): 918-923.

- Jousseume M et al., 2014. STARE-CAPMED (STation of Reference and rEsearch on Change of local and global Anthropogenic Pressures on Mediterranean Ecosystems Drifts): Rapport d'activité – Année 2013. Rapport de recherches, STARESO, 147 pp.
- Lafabrie C., Pergent-Martini C., Pergent G., 2008. Metal contamination of *P. oceanica* (L.) Delile meadows along the Corsican coastline (Mediterranean). Environ. Pollut., 151: 262–268.
- Lassauque J., 2009. Ecophysiological early biomarkers of anthropogenic-induced stress on *Posidonia.oceanica* (L.) Delile meadows. Thèse de doctorat: Sophia antipolis, Université de Nice. France.
- Lepoint G, Havelange S, Gobert S, Bouquegneau J.M., 1999. Fauna vs flora contribution to the leaf epiphytes biomass in a *Posidonia. oceanica* (L.) Delile seagrass bed (Revellata Bay, Corsica). Hydrobiologia 394 : 63-67.
- Luy N., Gobert S., Sartoretto S., Biondo R., Bouquegneau J.M., et al., 2012. Chemical contamination along the Mediterranean French coast using *Posidonia oceanica* (L.) Delile above-ground tissues: A multiple trace element study. Ecological Indicators, 18: 269-277.
- Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M., Friberg L.T., 2007. Handbook on the Toxicology of Metals, third ed. Elsevier Inc.
- Pasqualini V., Pergent-Martini C., Clabaut P., Pergent G., 1998. Mapping of *Posidonia oceanica* (L.) Delile using aerial photographs and side scan sonar: application off the Island of Corsica (France). Estuarine. Coastal and Shelf Science 47 : 359–367.
- Pelaprat C., Donnay A., Chery A., Missa A & Lejeune P., 2010. Mise en œuvre du contrôle de surveillance et opératoire au titre de la directive cadre eau pour l'indicateur benthos de substrat meuble dans le district corse (Eaux côtières)- Contrat STARESO/IFREMER
- Pergent-Martini C & Pergent G., 2000. Marine phanerogams as a tool in the evaluation of marine trace-metal contamination: an example from the Mediterranean. International Journal of Environment and Pollution, 13 : 126-147.
- Pergent G., 1987. Recherches lépidochronologiques chez *Posidonia oceanica* (L.) Delile (Potamogetonaceae). Fluctuations des paramètres anatomiques et morphologiques des écailles des rhizomes. Thèse doct. Océanol., Univ. Aix-Marseille II, Fr. : 1-853.
- Pinazo C., Fraysse M, Doglioli A., Faure V., Pairaud I., Petrenko A., Thouvenin B., Tronczynski J., Verney R., Yohia C., 2013. MASSILIA: Modélisation de la baie de MArSeILLe : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin.
- Pirc H., 1985. Growth dynamics in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. MarEcol, 6 (2) : 141-165
- PNUE/ PAM: Etat de l'environnement marin et côtier de la Méditerranée, PNUE/PAM-Convention de Barcelone, Athènes, 2012

- Rainbow P. S., 1995. Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4-12): 183-192.
- Rainbow P. S. et Phillips D. J. H., 1993. Cosmopolitan biomonitors of trace-metals. *Marine Pollution Bulletin* 26(11) : 593-601.
- Richir J., Gobert S., 2014. A reassessment of the use of *Posidonia oceanica* (L.) Delile and *Mytilus galloprovincialis* to biomonitor the coastal pollution of trace elements: new tools and tips. *Mar. Pollut. Bull*, 89 : 390-406.
- Richir J., Gobert S., 2016. Trace elements in marine environments: occurrence, threats and monitoring with special focus on the coastal Mediterranean. *J. Environ. Anal. Toxicol*, 6 (1).
- Richir J., Luy N., Lepoint G., Rozet E., AlveraAzcarate A., et al., 2013. Experimental in situ exposure of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile to 15 trace elements. *Aquat. Toxicol*: 140-141, 157-173.
- Richir J., Salivas-Decaux M., Lafabrie C., Lopez y Royo C., Gobert S., Pergent G., Pergent-Martini C., 2015. Bioassessment of trace element contamination of Mediterranean coastal waters using the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *J. Environ. Manag*, 151: 486-499.
- Romeo M., Gnassia-Barelli M., Juhel T., Meinesz A., 1995. Memorization of heavy metals by scales of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile, collected in the NW Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series*, 120: 211-218.
- Sanz-Làzaro C., Malea P., Apostolaki E. T., Kalantzi., Marin A, and Karakassis I., 2012 : The role of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile in the cycling of trace elements. *Biogeosciences*, 9 : 2497–2507.
- Sanz-Làzaro C., Navarrete-Mier, F., Marin., A., 2011. Biofilm responses to marine fish farm wastes, *Environ. Pollut*, 159 : 825-832.
- Sanchez-Lizaso J.L., 1993. Estudio de la pradera de *Psidonia oceanica* (L.) Delile de la reserva de Tabarca marina (Alicante): fenologia y produccion primaria. *Thesi Doctoral, Univ. de Alicante*: 1-12
- Skliris N., Goffart A., Hecq J.H., Djenidi S., 2001. Shelf-slope exchanges associated with a steep submarine canyon of Calvi (Corsica, NW Mediterranean Sea): modelling approach. *Journal of Geophysical Research*, 106 : 19883-19201.
- Turkmen, A., Turkmen M, Tepe Y et Akyurt I., 2005. Heavy metals in three commercially valuable fish species from Iskenderun Bay, Northern East Mediterranean Sea, Turkey. *Food Chemistry*, 91: 167-172.
- UNEP/MAP/Blue Plan, 2009. *State of the Environment and Development in the Mediterranean*. UNEP/MAP Blue Plan, Athens.

WHO., 1996. Trace elements in human nutrition and health. Geneva, WHO Library Cataloguing. 178 pp.

Wittmann K.J., 1984. Temporal and morphological variations of growth in natural stand of *Posidoniaoceanica* (L) Dellile .*P.S.Z.N.I. Marine Ecology*, 5(4): 301-316.. Contrat de baie de la métropole marseillaise: Agam - Juin 2012.

Biométrie foliaire de *Posidonia oceanica* (L.) Delile et bioaccumulation des éléments traces dans ses rhizomes

RESUME

Au cours de cette étude, nous avons examiné l'herbier de *Posidonia oceanica* (L.) Delile de la Stareso, un site de référence privilégié en raison de sa protection contre la pollution. Des échantillons de faisceaux ont été prélevés en face de la station à une profondeur de 10 mètres puis en suivant un profil bathymétrique, parallèlement à des enregistrements des paramètres environnementaux. Les différents paramètres et indices biométriques ont été mesurés et calculés. Des mesures des teneurs en éléments traces étaient prévues dans ces mêmes faisceaux de feuilles, mais n'ont pas pu être effectuées pour des raisons techniques. Nous avons donc analysé un jeu de données existant sur les teneurs en ETs dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Nous avons examiné le cycle saisonnier et pluriannuel ainsi que les variations spatiales à petite échelle des teneurs en éléments traces dans ces rhizomes. Pour ce faire, les rhizomes ont été échantillonnés dans six stations en Baie de Calvi en juin 2010, ainsi qu'à une profondeur de 10 mètres en face de Stareso et sur le Plateau des Chèvres, de manière saisonnière en 2008, 2009 et 2010.

Nos résultats montrent que certains éléments ont une affinité à s'accumuler dans les rhizomes, de sorte que les concentrations d'ETs varient en fonction de l'emplacement des stations d'échantillonnage et de la période d'échantillonnage. De plus, les niveaux de concentration relativement élevés de ces éléments sont principalement dus à des activités anthropiques plutôt qu'à des processus naturels, et les niveaux faibles ou en diminution/stabilisation au fil du temps sont probablement dus à la réduction de leur utilisation anthropique.

Le sédiment est un facteur primordial dans la détermination des concentrations bioaccumulées dans les rhizomes, car il conditionne son propre enrichissement en ETs puis la contamination des rhizomes par absorption par les racines. Quant aux paramètres biométriques des faisceaux de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, ils suivent les tendances saisonnières et bathymétriques connues, largement discutées dans la littérature scientifique. Enfin, cette expérience confirme la fiabilité de l'utilisation de *Posidonia oceanica* (L.) Delile comme bio-indicateur de la contamination chimique des sédiments.

Mots clés: Eléments traces, cycle saisonnier et pluriannuelle, variation spatiale, sédiment, rhizomes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, biométrie

ABSTRACT

In this study, we examined the *Posidonia oceanica* (L.) Delile herbarium at Stareso, a privileged reference site due to its protection against pollution. Samples of bundles were taken in front of the station at a depth of 10 meters and then following a bathymetric profile, parallel to recordings of environmental parameters. Different parameters and biometric indices were measured and calculated. Measurements of trace element content were planned in these same leaf bundles but could not be carried out for technical reasons. Therefore, we analyzed an existing dataset on trace element content in the rhizomes of *Posidonia oceanica* (L.) Delile. We examined the seasonal and multi-year cycle as well as small-scale spatial variations in trace element content in these rhizomes. To do so, the rhizomes were sampled at six stations in Calvi Bay in June 2010, as well as at a depth of 10 meters in front of Stareso and on the Plateau des Chèvres, seasonally in 2008, 2009 and 2010.

Our results show that some elements have an affinity to accumulate in rhizomes, so that trace element concentrations vary depending on the location of sampling stations and the sampling period. In addition, the relatively high concentration levels of these elements are mainly due to anthropogenic activities rather than natural processes, and low or decreasing/stabilizing levels over time are likely due to the reduction of their anthropogenic use.

Sediment is a primary factor in determining bioaccumulated concentrations in rhizomes, as it conditions its own enrichment in trace elements and then contamination of the rhizomes by absorption through the roots. As for the biometric parameters of *Posidonia oceanica* (L.) Delile bundles, they follow known seasonal and bathymetric trends, widely discussed in scientific literature. Finally, this experiment confirms the reliability of using *Posidonia oceanica* (L.) Delile as a bio-indicator of chemical contamination in sediments.

Keywords: Trace elements, seasonal and multi-annual cycle, spatial variation, sediment, *Posidonia oceanica* (L.) Delile, rhizomes, biometry.

من خلال هذه الدراسة، عالجنا في البداية *Posidonia oceanica* (L.) Delile في Stareso الواقعة في خليج Calvi ، وهو موقع مرجعي متميز لأنه محمي من التلوث. أمام هذه المحطة، تم القيام بأخذ حزم الأوراق من هذه العشبية على عمق 10 م وعلى مستوى أعماق أخرى وفق خط مستقيم، إضافة إلى تسجيلات العوام البيئية. تم قياس المعلمات والمؤشرات البيو مترية وحسابها، ثم على الأوراق نفسها، تم التخطيط لقياس محتوياتها من العناصر المعدنية، لكن ولأسباب تقنية، هذه الأخيرة لم تتم. لذلك، تم تحليل مجموعة من البيانات، جاهزة مسبقاً، لمحتويات rhizomes هذه العشبية من العناصر المعدنية، حيث اهتمنا بالتطورات الموسمية و متعددة السنوات، وكذلك الاختلافات المكانية على نطاق صغير لتراكيز هذه العناصر. وللوصول إلى هذه الغاية، تم أخذ عينات من rhizomes في 6 مواقع في خليج Calvi في يونيو 2010، وكذلك أمام Stareso و في Plateau des Chèvres بمرسيليا عام 2009، 2008 و 2010، بوتيرة موسمية على عمق 10 م.

نتائجنا تظهر أن بعض العناصر لها انجذاب للتراكم في الجذور وأن تركيز هذه العناصر يختلف باختلاف موقع أخذ العينات ومع فترة أخذها. بالإضافة إلى ذلك، المستويات العالية نسبياً من هذه العناصر راجع للأنشطة البشرية أكثر من الطبيعية، والمستويات المنخفضة أو التي تظهر في انخفاض أو استقرار مع مرور الوقت يرجع ربما إلى انخفاض في استخدام البشري لها. الرواسب أيضاً هي عامل رئيسي في تحديد مستويات التراكم في جذور لأنه يحدد مدى تشبعه بالعناصر المعدنية، وبالتالي مدى تلوث rhizomes من خلال امتصاصها عبر الجذور أما بالنسبة للمعلمات البيو مترية لحزم الأوراق، فأنها تتبع الاتجاهات الموسمية وقياس الأعماق، المعروفة و التي تم مناقشتها على نطاق واسع في المنشورات العلمية

و أخيراً أكدت هذه التجربة موثوقية استخدام *Posidonia oceanica* (L.) Delile كمؤشر بيولوجي للتلوث الكيميائي للرسوبيات

كلمات البحث

دورة موسمية و متعددة السنوات، الاختلاف المكاني، الرواسب، rhizomes، البيو مترية